

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie



**Posouzení a optimalizace výrobitelnosti vybraného dílu  
automobilové karoserie s využitím numerických  
simulací**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Jiří Flodрман

Květen 2013

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

**Fakulta strojní**

Studijní program B2341 – Strojírenství

3911R018 Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

Posouzení a optimalizace výrobitelnosti vybraného dílu  
automobilové karoserie s využitím numerických simulací

Assessment and optimization manufacturability of the selected car  
body part by using numerical simulations

Bakalářská práce

KSP – TP –

Jiří Flodрман

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D., TU v Liberci, KSP  
Konzultant bakalářské práce: Bc. Miloslav Botka, Aufeer Design s.r.o.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	56
Počet obrázků	31
Počet příloh	30
Počet tabulek	3

Datum: 24.5.2013

**Místo pro vložení originálního zadání BP**

## **A N O T A C E**

### **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní**

#### **Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: B2341 – Strojírenství  
Student: Jiří Flodрман  
Téma práce: Posouzení a optimalizace výrobitelnosti vybraného dílu automobilové karoserie s využitím numerických simulací  
  
Assessment and optimization manufacturability of the selected car body part by using numerical simulations

Číslo BP: KSP – TP -  
Vedoucí BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D., TU v Liberci, KSP  
Konzultant: Bc. Miloslav Botka, Aufeer Design s.r.o.

#### **Abstrakt:**

Tato práce se zabývá nejčastěji používanými materiály v konstrukci karoserie. Následně je vysvětlen pojem lisovatelnost. Poté je popsán vývoj a simulace vybraného dílu karoserie.

**Klíčová slova:** simulace, karoserie, výrobitelnost, materiály

#### **Abstract:**

This work deals with the most commonly used materials in the construction of car body. Followed by the explanation of term pressability. Then is describe development and simulation of selected car body part.

**Keywords:** simulation, car body, manufacturability, materials



**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....  
Jiří Flodрман  
Bezručova 1263  
293 01 Mladá Boleslav

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat firmě AUFEER DESIGN, s. r. o., která mi umožnila vytvoření bakalářské práce v jejich prostorách. Dále konzultantům Bc. Miloslavu Botkovi a Tomáši Vobořilovi za poskytnuté informace a pomoc při tvorbě bakalářské práce.

## **Obsah**

Úvodní strana	
Zadání bakalářské práce	
Anotace	
Místopřísežné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	6
Seznam symbolů a jednotek	7
1. Úvod	8
2. Materiály používané při stavbě karoserie automobilu	10
2.1 Ocelové plechy	10
2.1.1 Dělení dle tažnosti	11
2.1.2 Dělení podle metalurgických názvů	13
2.1.2.1 Plechy z refosforizovaných a mikrolegovaných ocelí	13
2.1.2.2 Plechy z IF ocelí	14
2.1.2.3 Plechy z IF ocelí s BH efektem	14
2.1.2.4 Plechy z CMn ocelí	15
2.1.2.5 Plechy z IS ocelí	15
2.1.2.6 Plechy z dvoufázových ocelí	15
2.1.2.7 Plechy z CP ocelí	16
2.1.2.8 Plechy z ocelí s transformačně indukovanou plasticitou	16
2.1.2.9 Plechy z MS ocelí	17
2.1.2.10 Plechy z FB ocelí	17
2.1.2.11 Plechy z TWIP ocelí	18
2.1.2.12 Plechy z UHSS-b ocelí	18
2.2 Hliníkové slitiny	19
3. Lisovatelnost plechů	20
3.1 Základní pojmy	20
4. Numerická simulace	22
5. Vlastní postup návrhu tahového modelu	31
5.1 První simulace	31
5.2 Druhá simulace	33
5.3 Třetí simulace	36
5.4 Čtvrtá simulace	38
5.5 Pátá simulace	39
5.6 Šestá simulace	41
5.7 Sedmá simulace	42
5.8 Osmá simulace	44
5.9 Devátá simulace	45
5.10 Desátá simulace	48
6. Zhodnocení	51
7. Závěr	52
8. Použitá literatura	55
9. Přílohy	56

## Seznam symbolů a jednotek

$A$	Tažnost	[%]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu - nevýrazná	[MPa]
$R_m$	Smluvní mez pevnosti	[MPa]
$R_e$	Smluvní mez kluzu - výrazná	[MPa]
$r$	Normálová anizotropie	[ - ]
$\sigma$	Napětí v tahu	[MPa]
$E$	Youngův modul pružnosti	[MPa]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	[ - ]
$\mu$	Poissonova konstanta	[ - ]

## 1. Úvod

Nacházíme se v době, kdy dochází ke globalizaci napříč celým světem, což zvyšuje tlak na snižování výrobních nákladů, ale i na samotnou cenu výrobků. Proto je velmi důležité, aby výroba jednotlivých výrobků byla co nejvíce efektivní, a zároveň se poslední dobou klade důraz i na ekologii, ať už výroby, tak i samotného výrobku.

V automobilovém průmyslu tímto vzniká celá řada konfliktů při návrhu automobilu samotného (například se musí volit konstrukce s pokud možno co nejmenší hmotností, ale zároveň se zachovanou velkou mírou bezpečnosti) a nízkou cenou. Díky tomu dochází k čím dál většímu využívání simulačních softwarů používaných při vývoji automobilu, ale i k přípravě výroby samotné. Dochází tak k lepší optimalizaci celého procesu výroby i vyššímu využití strojů a materiálu, což následně vede ke snížení ceny výrobku.

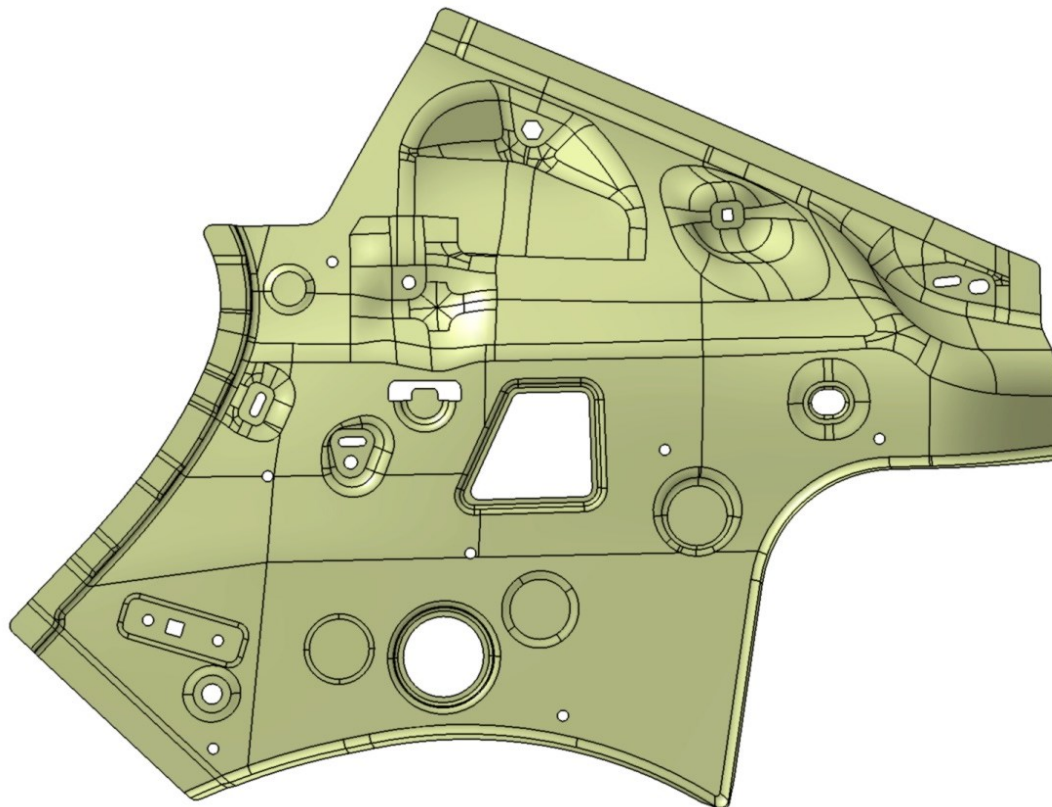
Konstrukce dnešního automobilu je velmi složitá a využívá se celá řada materiálů s různými mechanickými vlastnostmi, ať už jde o povlakované ocelové plechy, vysokopevnostní ocelové plechy či hliníkové materiály a v neposlední řadě se také objevují plasty.

Prvním krokem při výrobě lisovaného dílu, je vymodelování modelu za pomoci některého z řady CAD programů. V této práci je použit program CATIA V5 od francouzské firmy Dassault Systèmes, který nachází využití v celé řadě průmyslových odvětví od konstrukce automobilů, lodí a letadel až po návrhy počítačů.

Dále následuje vložení dat do softwaru pro simulaci lisování. V této práci je použit software Autoform R3 od švýcarské firmy Autoform. Tento program pomáhá zobrazit nedostatky v konstrukci i samotné technologii výroby výlisku. Následně je třeba podle výsledků upravit model pro tažení či parametry technologie.

Volba použitých softwarů byla určena požadavky a možnostmi firmy Aufeer Design.

Vybrané díly karoserie automobilu se nacházejí v oblasti C sloupku karoserie. Oba díly jsou navzájem mírně odlišné, ale to na lisování nemá zásadní vliv. Jak takový díl vypadá, vidíme na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Díl pro pravou stranu karoserie [1]

Cílem této práce je zmapovat nejčastěji používané materiály při stavbě automobilové karoserie, vysvětlit pojem „lisovatelnost“ ocelových plechů a faktory, které ji ovlivňují, určit význam a způsob využití numerických simulací při návrhu technologie lisování za použití softwaru Autoform R3. Cílem je vytvořit výlisek tak, aby byla zajištěna jeho vyrobitelnost a procesní jistota.

## **2. Materiály používané při stavbě karoserie automobilu**

Dnešní konstrukce automobilu je velmi složitá, a proto dochází k používání více druhů materiálů při její stavbě, především to jsou ocelové plechy, plechy z hliníkových slitin, případně slitiny hořčíku a poslední dobou se rozšiřuje využití plastů. Použití různých materiálů je potřeba vzhledem k neustálému tlaku na snižování hmotnosti vozidla a tím snižování spotřeby paliv i emisí vozidla. Zároveň je třeba zvyšovat bezpečnost a celkovou odolnost automobilu, ať už při kolizi nebo proti povětrnostním vlivům.

Jelikož hmotnost karoserie tvoří stále největší část hmotnosti vozidla, je potřeba pracovat na dokonalejší konstrukci a využití moderních technologií a materiálů. Zároveň je však potřeba zachovat co nejnižší cenu, proto není možné využívat všechny dostupné technologie a materiály. Cílem je tedy nalézt optimální kompromis v konstrukci automobilu a zároveň zajistit co nejvyšší využití materiálů a strojů ve výrobě. V důsledku toho bude výsledná cena výlisku optimální a tím pádem dojde i ke snížení ceny vozidla. Bohužel se tento parametr stává čím dál důležitějším, ať je to dáno aktuální recesí či společenskou náladou v Evropě.

Vzhledem k tomu, že ocelové plechy v současné době stále tvoří největší část materiálů používaných při konstrukci, práce se tedy bude věnovat především jim. Ocelové plechy u většiny aut střední třídy tvoří cca 80 až 90% materiálu použitého ke konstrukci karoserie. Toto procento klesá s velikostí a cenou vozu na úkor hliníkových slitin. To znamená, že čím větší automobil je vyráběn, tím je více používáno lehkých slitin. Výjimku tvoří například automobily značky Audi, jejíž automobily mají celohliníkovou konstrukci. [6]

### **2.1 Ocelové plechy**

V této části práce budou popsána dvě rozdělení ocelových plechů. V dnešní době se v konstrukci karoserie používá čím dál více pevnostních plechů (lze použít materiál s menší tloušťkou), což má za následek snížení hmotnosti karoserie a v souvislosti s tím klesnou i emise automobilu.

Problém však nastává u tváření těchto plechů, neboť s vyšší pevností klesá tažnost. Toto se snaží odstranit moderní materiály s vícefázovým strukturním zpevněním. A v neposlední řadě se začíná čím dál více uplatňovat lisování za tepla, kdy dojde ke snížení mechanických vlastností materiálu a je tedy zlepšena lisovatelnost plechu.

Bohužel dnes neexistuje jednotné rozdělení ocelí používaných při konstrukci automobilů. Mnohdy také nastává problém, že určitý materiál podle chemického složení se může vyskytovat v různých skupinách. Toto se vyskytuje například u dělení na oceli s nízkou pevností, vysokopevnostní, ultravysokopevnostní apod. Kde například TRIP (viz. 2.1.2.8) ocel může být ve všech kategoriích. [3]

### **2.1.1 Rozdělení podle tažnosti**

Jedná se o běžně používané plechy při stavbě karoserie, které jsou rozděleny do několika skupin podle kvality:

- Plechy běžné kvality
- Tažné plechy (drawing quality steels)
- Hluboko tažné plechy ( deep drawing quality steels)
- Extra hlubokotažné plechy (extra deep drawing quality steels)
- Super hlubokotažné plechy (super deep drawing quality steels)

Ve většině případů je plech povrchovou ochranou chráněn proti povětrnostním vlivům. Běžně se na plechy nanáší vrstva ze zinku či hliníku, popřípadě i kombinace s jinými prvky. Jedná se o kontinuální žárové ponorové povlakování.

Z této skupiny plechů je pro tuto práci důležitý materiál s označením DX56D+Z100MB, ze kterého bude vyráběn díl automobilové karoserie. Jedná se o materiál patřící do skupiny extra hlubokotažných plechů s předepsaným chemickým složením:



Tab. 1. Chemické složení materiálu DX56D+Z100MB [2]

Chemické složení Maximální % z hmotnosti					
C	Si	Mn	P	S	Ti
0,12	0,50	0,60	0,10	0,045	0,30

S předepsanými mechanickými vlastnostmi:

Tab. 2 Mechanické vlastnosti materiálu DX56D+Z100MB [2]

Mechanické vlastnosti		
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost $A_{80\text{ mm}}$ min [%]
120-180	260-350	39

Z100 v označuje vlastnosti povlaku, kdy se jedná o kontinuální žárové pozinkování:

Tab. 3 Vlastnosti povlaku Z100MB [2]

Označení povlaku	Minimální hmotnost povlaku pro obě plochy [g/m <sup>2</sup> ]		Teoretické hodnoty tloušťky povlaku pro plochu při měření na jednom místě [μm]		Hustota Povlaku [g/cm <sup>3</sup> ]
	Měření na třech místech	Měření na jednom místě	Typická hodnota	Rozsah	
Z100	100	85	7	5 až 12	7,1

Písmeno **M** značí, že nejsou vidět kousky zinku na povrchu a písmeno **B** znamená, že jsou povoleny malé vzhledové vady povrchu materiálu. Ty vlastnosti jsou dostačující vzhledem k tomu, že se jedná o tzv. vnitřní plech, který není vidět a jeho drobné povrchové vady tak nevadí.

Výhodou tohoto typu povlaku vůči elektrolytickému pozinkování je vhodnost pro hluboké tažení i velmi náročných dílů. Navíc kvalita povrchu je velmi dobrá, tzn., že lze použít plechy s tímto typem povlaku i na vnější

lakované díly. Další výhodou je, že zinková vrstva je elastická a nedochází tedy k jejímu popraskání v průběhu lisování.

### **2.1.2 Dělení podle metalurgických názvů**

Toto označování vychází většinou z nějaké specifické vlastnosti materiálu nebo případně z jeho chemického složení. Bohužel složení materiálu se u jednotlivých výrobců liší, proto uváděné hodnoty v této kapitole jsou pouze orientační.

#### **2.1.2.1 Plechy z refosforizovaných a mikrolegovaných ocelí**

Mikrolegované oceli mají nízký obsah uhlíku a obsahují řadu legovacích prvků, např. mangan, křemík, hliník, vanad, titan atd. Dobré mechanické vlastnosti jsou získány kombinací většího množství různých legovacích prvků a následným tepelným zpracováním při výrobě. Obsahy jednotlivých prvků jsou však velmi nízké. Tyto oceli mají dobrou tvářitelnost a svařitelnost při zachované vysoké pevnosti. Struktura těchto ocelí je různorodá, feritická, feriticko-perlitická a nebo feriticko-martenzitická. Proti běžným uhlíkovým ocelím jsou výrazně lehčí při stejné pevnosti. Mez kluzu je 240 až 520 MPa a mez pevnosti 350 až 590 MPa. Mají dobrou tažnost a jsou proto vhodné na náročné výlisky. Případně na dynamicky namáhané díly. Dnes se již téměř nepoužívají kvůli vysoké hmotnosti. [3,4,5,6]

Refosforizované oceli patří do skupiny mikrolegovaných ocelí, ale je zde použito vyšší procento fosforu. Fosfor zvyšuje mez kluzu a mez pevnosti tím, že atomy fosforu v tuhém roztoku zaujímají substituční polohu ve struktuře materiálu. Oceli tímto rostou tvrdost, ale zároveň se ocel stává křehčí. Mez kluzu se pohybuje v rozmezí 180 až 420 MPa a mez pevnosti je 360 až 540 MPa. Tažnost je 5 až 45%. Používá se například pro kapoty a střechy. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.2 **Plechý z IF ocelí (Interstitial Free Steels)**

Uvedený materiál má velmi dobrou tvářitelnost a ne příliš vysokou pevnost. Vyznačuje se minimálním množstvím intersticiálního uhlíku a dusíku. Toto má za následek výbornou tvářitelnost při nízkých mechanických hodnotách. Struktura je feritická a její jemnost určuje mechanické vlastnosti. Pokud se materiál leguje niobem či titanem dojde ke zpevnění materiálu při zachování dobré tvářitelnosti. Materiál se navíc vyznačuje vysokým exponentem deformačního zpevnění a normálové anizotropie. Mez kluzu je 180 až 340 MPa, mez pevnosti 340 až 460 MPa a tažnost 30 až 50%. Tato ocel se používá především pro povrchové díly karoserie, například pro blatníky a vnější plech dveří.

Běžné chemické složení je maximálně 0,005% uhlíku, u moderních typů ocelí je to až 0,012% C. Dále je ocel tvořena maximálně 0,0066% N, 0,3% Ti, 0,035% Nb, 1,6% Mn, 0,3% Si, 0,02% Al, 0,1% P a 0,025% S. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.3 **Plechý z IF ocelí s BH efektem**

BH čili Bake hardened jsou ocele, u kterých dochází ke zvýšení meze kluzu při vytvrzování laku o cca 30 až 80 MPa. Toto je výhodné především u povrchových dílů karoserie, kde zvýšení meze kluzu má za následek zvýšení odolnosti proti vtlačení. Během vypalování laku dojde k blokování pohybu dislokací. Velikost BH efektu závisí na chemickém složení a na mechanickém zpracování materiálu. Výhodou těchto ocelí je velmi dobrá tvárnost při lisování a podle vlastností materiálu jsou tyto plechy vhodné především pro dveře, kapoty, víka zavazadlového prostoru. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.4 **Plechý z CMn ocelí** (Carbon-manganesesteels)

Plechý takto označované mají zvýšenou mez únavy. Jedná se o feriticko perlitickou strukturu, ale po následném tepelném zpracování se ve struktuře objevuje i bainit nebo martenzit. Zrno lze zjemnit přidáním hliníku. Mez kluzu je 170 až 460 MPa, mez pevnosti 230 až 610 MPa a tažnost 15 až 35 %. Používá se na výztuhy.

Obsah uhlíku je v rozmezí 0,14 až 0,5% a další prvky 0,7 až 1,9% Mn, 0,15 až 0,5% Si, 0,2 až 0,35 Cu, 0,035 až 0,04% P a 0,04 až 0,05% S. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.5 **Plechý z IS ocelí** (Isotropic Steels)

Mají feritickou strukturu a, jak název napovídá, tyto plechy se vyznačují izotropií mechanických vlastností. Mají zvýšenou odolnost proti stárnutí a jsou vhodné k povlakování. Mez kluzu je 180 až 310 MPa, mez pevnosti 270 až 390 MPa a tažnost 30 až 40 %. Nejčastěji se používají pro střechy automobilů.

Chemické složení bývá 0,03 až 0,06% C, 0,5 až 1,1% Mn, 0,08 až 0,2 Si, 0,015 až 0,07 Al, N do 0,007%, Ni do 0,04%, Cu do 0,04, P do 0,035%, S do 0,015 %, Mo do 0,008%, Ti do 0,005%. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.6 **Plechý z dvoufázových ocelí** (Dualphase steels)

Jinak označované jako DP oceli jsou nízkouhlíkové a mikrolegované. Vhodným tepelným zpracováním dochází ke vzniku dvoufázové struktury – feritické a martenzitické (20-70%). To znamená, že materiál má vysokou pevnost, ale i dobrou tvárnost a svařitelnost. Dále se vyznačují velkým deformačním zpevněním při tváření za studena. Navíc má materiál vynikající odolnost vůči vzniku a šíření únavového lomu. Používají se např. na spojovací materiál či nárazníky.

Mez kluzu může být 280 až 780 MPa, mez pevnosti 450 až 1200 MPa a tažnost 5 až 30%. Používají se především na sloupky karoserie, prahy, nárazníky apod. Oproti mikrolegovaným ocelím má tento materiál lepší poměr meze kluzu a pevnosti.

Chemické složení je 0,05 až 0,4% C, 0,01 až 1,5% Al, 0,01 až 1,5% Si, 0,4 až 2,5% Mn, 0,002 až 0,009% N, 0,3 až 1% Cr, 0,2 až 0,8 Mo, 0,015 až 0,03% Ti, 0,03 až 0,12% Nb, 0,4 až 0,6% P, 0,05 až 0,15% V, 0,01 až 0,012 S a maximálně 0,005% B. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.7 **Plechý z CP ocelí** (Complex Phase Steels)

Jejich struktura je feriticko-bainitická s malým podílem perlitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Svých mechanických vlastností dosahují díky tzv. strukturnímu zpevnění. To znamená, že struktura je tvořena jemnou feritickou matricí s obsahem tvrdých fází a precipitátů. Jsou to plechy s vysokou pevností, tvrdostí, deformačním zpevněním a navíc i s rozměrovou stálostí výlisku. Mez kluzu mají 360 až 950 MPa, mez pevnosti 600 až 1200 MPa. Tyto plechy mají velmi dobrou schopnost absorpce mechanické energie a z toho vychází i jejich použití na karoserii (výztuhy a deformační zóny).

Chemické složení je 0,12 až 0,17% C, do 2,2%% Mn, 0,8% Si, 0,04% P, 1% Cr+Mo, 0,015% S, 1,2% Al, 0,2% V a 0,005% B. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.8 **Plechý z ocelí s transformačně indukovanou plasticitou** (TRIP ocele)

Jedná se o nízkouhlíkové ocele, kde základem je feritická matrice a vysoké procento zbytkového austenitu (asi 5-10%). Uvedený austenit se při deformaci mění na martenzit, což vede ke zvýšení pevnosti. Tzn. že materiál má vysokou tažnost, 20 až 80%, ale zároveň i velmi vysokou mez kluzu 380 až 550 MPa a mez pevnosti 590 až 900 MPa. Dále se projevují malým ztenčením během tváření. Používají se na nosníky karoserie a B sloupky karoserie, díky schopnosti absorbovat

velké množství energie a výborným únavovým vlastnostem. TRIP ocel obsahuje více uhlíku než DP oceli a proto je třeba přesněji kontrolovat výrobní proces.

Jsou dva možné způsoby aktivace přeměny austenitu na martenzit. Při nízkém obsahu uhlíku k transformaci dochází již při tváření a při vyšším obsahu se tak děje až při nárazu automobilu.

Chemické složení je max 0,24% C, 1,6% Al, 2% Mn, 0,01% S, 0,3% Si, 0,04% P, 0,005% B, 0,6% Cr+Mo a 0,2% Nb+Ti. V současné době se však Si nahrazuje malým množstvím Al a 0,05 až 0,1% P. Tyto složky snižují tvorbu cementitu, což má za důsledek větší tvorbu feritu a bainitu. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.9 **Plechý z MS ocelí** (Martensitic Steels)

Jsou plechy s velkým podílem martenzitické struktury (min. 30%). Důležité je jejich tepelné zpracování, kdy se velmi zvýší rychlost ochlazování a zároveň se zvýší deformace při válcování. Nevýhoda těchto plechů spočívá ve velmi malé tažnosti, která je dána velmi malým obsahem feritu. Mez kluzu se pohybuje mezi 720 až 1200 MPa, mez pevnosti 800 až 1650 MPa a tažnost je kolem 5 až 15%. Díky těmto vlastnostem se tyto plechy lisují za studena jen ve velmi malé míře, jde především o výztuhy tvaru „U“. Ve většině případů jde o tváření za tepla, kdy dojde k zakalení přímo v nástroji. To znamená, že nástroj musí být chlazen. Z hlediska mechanických vlastností a odolnosti proti cyklickému zatížení dosahují výlisky zpracované za tepla vyšší kvality než u materiálu zpracovaného za studena. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.10 **Plechý z FB ocelí** (Ferritic-Bainitic Steels)

Struktura těchto plechů je tvořena feritem a bainitem. Mez kluzu je 300 až 600 MPa, mez pevnosti 450 až 680 MPa a tažnost 16 až 30%. Je to materiál, který má vysoké deformační zpevnění. Toho se dosahuje zjemněním zrna. Jsou to ocele s dobrou odolností vůči

nárazu, únavě a dobrou svařitelností. Používají se na disky kol a nosníky [3,4,5,6]

#### 2.1.2.11 **Plechý z TWIP ocelí** (Twinning Induced Plasticity)

Jsou oceli s velmi vysokým obsahem manganu asi 15 až 20% a dolegovány hliníkem a křemíkem. Tento materiál dosahuje extrémních hodnot tažnosti až 125% a zároveň má velmi vysokou pevnost. Mez kluzu se pohybuje v rozhraní 280 až 1350 MPa a mez pevností 580 až 1470 MPa. Materiál má také velké deformační zpevnění při velkých deformacích. Deformační mechanismus je dvojčatění, což má za následek to, že zůstává zachován austenit ve struktuře a pouze dochází ke změně jeho krystalografické orientace. Použití pro B sloupky a výztuhy.

Chemické složení je 0,02 až 0,6% C, 0,45 až 3,3% Mn, 0,2 až 3,3% Si, 0,02 až 8,6% Ni a max. 8,4% Al, 18,3% Cr, 0,033% Nb, 0,0033 S. K výraznému TWIP efektu dochází při obsahu manganu nad 20%, pokud je ho méně než 15% pouze k TRIP efektu. [3,4,5,6]

#### 2.1.2.12 **Plechý z UHSS-b ocelí** (Boron Steels)

Jsou tvořeny martenzitickou strukturou se zbytkovým austenitem. Jedná se o nejpevnější používané plechy. Vyznačují se velmi malým obsahem bóru, který zabraňuje tvorbě feritu a podporuje tvorbu martenzitu. U tohoto materiálu velmi záleží na tepelném zpracování. Mez kluzu začíná kolem 430 MPa, po tepelném zpracování a díky využití BH efektu končí mez kluzu až na 1770 MPa, mez pevnosti je 500 až 2034 MPa. Tažnost může být 5 až 41%. Díky těmto vlastnostem lze použít méně masivní konstrukce a tím zmenšit hmotnost karoserie. Nevýhodou však je, že po deformaci již materiál nelze narovnat do původního stavu. Pokud tedy k deformaci dojde, musí se díl vyměnit za nový. Nevýhodou vysoké pevnosti je zvýšená křehkost a možnost vzniku trhliny při deformaci. Tento materiál je

vhodné použít v místech, kde je potřeba zachovat co nejvyšší míru bezpečí.

Chemické složení je 0,07 až 0,67% C, 0,02 až 0,05 Ti, 0,15 až 3,8% Ni, 0,1 až 0,15% V, 0,3 až 2% Mn, 0,015 až 0,065 Al, 0,0005 až 0,005% B, 0,15 až 2,2% Si, 0,13 až 1,45% Cr, 0,08 až 0,35% Mo, 0,008 až 0,05% S a 0,025 až 0,04% P. [3,4,5,6]

## 2.2 Hliníkové slitiny

Nedílnou součástí konstrukce automobilu se také staly hliníkové slitiny. Jejich výhoda spočívá v nízké měrné hmotnosti, ale na druhou stranu mají nižší pevnost a proto je třeba masivnější konstrukce. To má za následek, že úspora hmotnosti není přímo úměrná rozdílu hustot ocele a hliníku. Další výhodou je zajisté i odolnost vůči korozi a možnost recyklace, která ale je složitější než u oceli. Nevýhodou je velmi vysoká cena, což znamená, že obdobná konstrukce je téměř dvakrát dražší než ocelová. To je způsobeno nejen vyšší cenou materiálu, ale také jinými technologickými procesy v průběhu výroby. Jde především o svařování, spojování za studena a změny v procesu lakování.

Využití tohoto materiálu také souvisí s rozměry a cenou daného vozu, čím vyšší jsou tyto parametry, tím více je využíváno plechů z hliníkových slitin.

V současné praxi se v konstrukci využívají hliníkové slitiny řad 5xxx a 6xxx, které mají mez kluzu cca 100 až 150 MPa, mez pevnosti 200 až 300 MPa a tažnost kolem 20 až 30 %. Řada 6xxx umožňuje ve většině případů využít BH efekt, což řada 5xxx neumožňuje. Proto řada 6xxx patří k nejpoužívanějším v automobilovém průmyslu v Evropě. Tato řada materiálů má velmi dobrou hlubokotažnost, odolnost proti vtlačení a vysokou kvalitu povrchu.

Problém nastává při samotném lisování, kdy dochází k velkému odpružení výlisku a je proto nutné s tím při konstrukci počítat. Další nevýhodou je horší svařitelnost takových plechů vůči ocelovým.



V neposlední řadě brání většímu využití hliníkových slitin také jejich cena, která je významně vyšší než u ocelových plechů. [3,4,5,6]

### **3. Lisovatelnost plechů**

Lisovatelnost plechů je schopnost materiálu změnit trvale svůj tvar při působení vnějších sil. Tato schopnost je závislá především na plastických vlastnostech materiálu, které vychází z fyzikálních vlastností, chemického složení a podmínek při tváření.

Lisování v dnešní době je neodmyslitelnou součástí průmyslové výroby. Umožňuje totiž výrobu nejrůznějších tvarů a rozměrů. Výhodou je také, že výsledný výrobek disponuje kvalitním povrchem, vysokou přesností rozměrů a při využití konstrukčních možností i nízkou hmotností při zachování dostatečné tuhosti. Při tváření za studena se navíc zvyšují mechanické vlastnosti materiálu.

#### **3.1 Základní pojmy**

##### **Lisovatelnost**

Je ovlivněna jak plastičností, tak i tvářitelností a dalšími faktory, například tvarem výlisku, funkcí soustavy stroj – nástroj, interakcí mezi nástrojem a plechem a v neposlední řadě materiálem plechu.

##### **Tvářitelnost**

Je hodnocení materiálu z hlediska závislosti na tváření ve vztahu k předpokládané technologii.

## **Technologická tvářitelnost**

Popisuje vhodnost materiálu pro danou technologii. Je závislá především na:

- Deformační schopnosti – tvárnosti či plastičnosti
- Deformačním odporu

## **Plastičnost**

Schopnost materiálu k trvalým změnám tvaru při působení vnějších sil bez porušení celistvosti. Tato vlastnost závisí na různých podmínkách při tváření, například na rychlosti deformace, stavu napjatosti a teplotě, ale i na vlastnostech materiálu samotného.

## **Deformační odpor**

Označuje velikost napětí potřebnou k tomu, aby v materiálu vznikly plastické deformace.

Následuje několik faktorů, které ovlivňují technologickou tvářitelnost:

- Materiál – materiál samotný do velké míry ovlivňuje technologickou tvářitelnost, a to především jeho chemické složení, tzn. obsah uhlíku, a jeho struktura
- Použitá technologie
  - změna teploty – ta má vliv na velikost přetvárného odporu, čím je teplota vyšší, tak je odpor menší
  - rychlost deformace – ovlivňuje velikost deformačního odporu, čím vyšší rychlost, tím je odpor vyšší
  - stav napjatosti - jednoosá, dvouosá či tříosá napjatost, ovlivňuje velikost deformačního odporu
  - stupeň deformace – s vyšším stupněm deformace rostou mechanické vlastnosti materiálu

#### 4. Numerická simulace

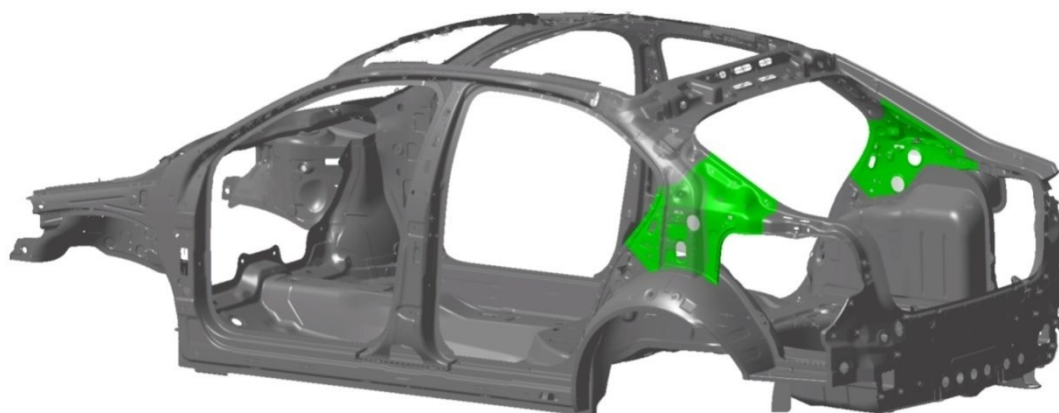
Stává se čím dál častější součástí výroby, neboť samotné výlisky z plechu jsou složitější ať už z důvodu designu či požadavků na bezpečnost. Bohužel však stále neexistuje jednoduchá metoda, jak navrhnout nástroj tak, aby došlo k bezproblémovému náběhu nového výrobku bez vad.

Následné odstranění závad výlisků až po začátku výroby je velmi náročné a někdy až nemožné. Mnohdy je totiž potřeba upravit samotný lisovací nástroj. Při konstrukci nástroje se lze spoléhat na zkušenosti pracovníků, ale tato cesta není vždy úplně jistá. Proto se rozvíjí využití simulačních výpočtů, které pomáhají odhalit konstrukční a technologické problémy ještě před začátkem výroby nástroje. Tím dochází ke značnému zrychlení a zlevnění předvýrobních procesů.

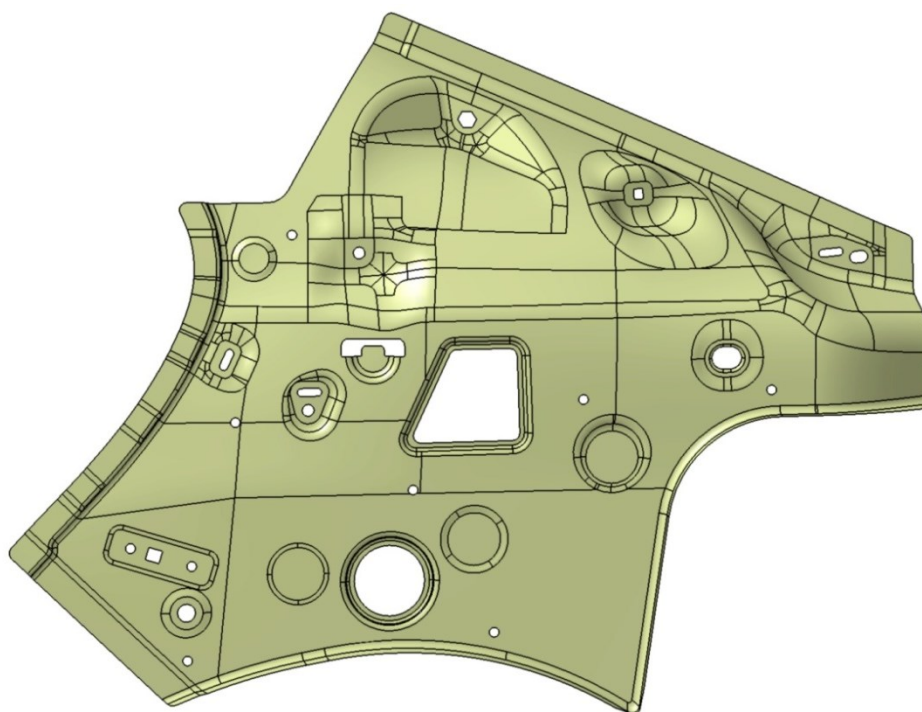
Na trhu existuje celá řada softwarů, ale většina z nich využívá metodu konečných prvků. Výhodou těchto softwarů je rychlost samotného výpočtu i pro složité součásti. Avšak tato metoda bude zřejmě v budoucnu nahrazena nějakou novou metodou, která bude ještě přesnější. Toto bude umožněno díky čím dál většímu výkonu počítačů, na kterých budou simulace počítány.

Samotná metoda konečných prvků je založena na tom, že se kontinuum rozdělí na nějaký konkrétní počet prvků a jednotlivé změny prvků se určují pouze v jejich uzlových bodech. Následně jsou pak dopočítány změny jednotlivých prvků. Toto znamená poměrně velké zjednodušení výpočtu, ale zároveň zavedení určité nepřesnosti výsledků. Samozřejmě také záleží na množství a tvaru jednotlivých prvků, ale čím více jich je použito, tím je výpočet složitější. Bohužel však není možné nikdy dosáhnout nekonečného množství prvků.

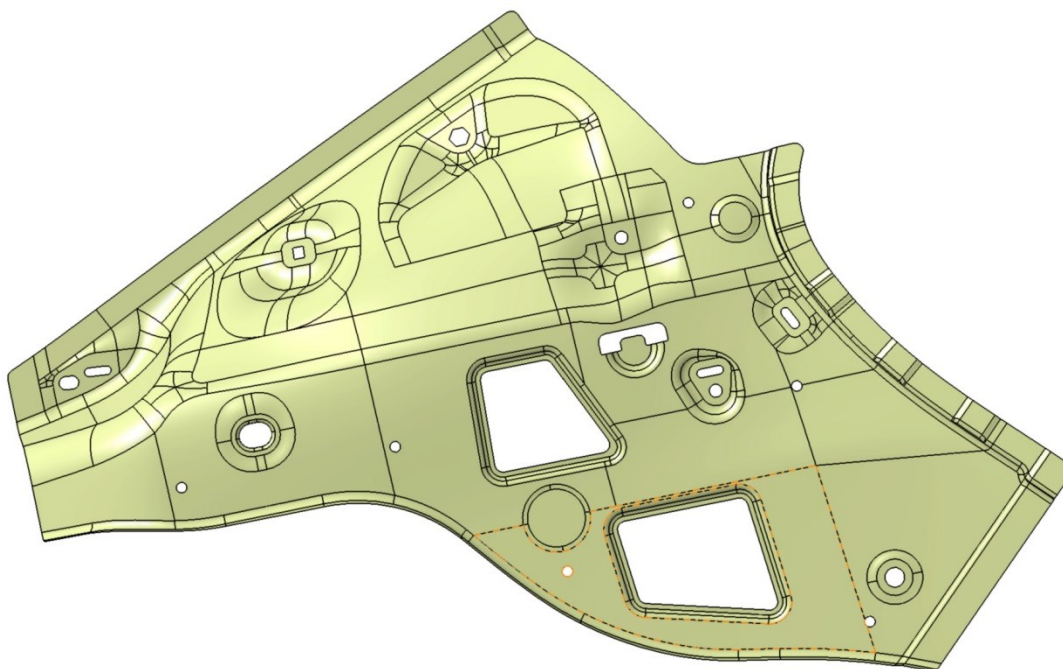
Tato práce se věnuje pouze programu Autoform, kde je vyzkoušena simulace následujícího dílu karoserie. Tento díl se nachází na vnitřní části C sloupku, viz. obr. 4.1., tudíž tvoří nosnou část karoserie vozu. Díl je připojen na další části karoserie, tudíž je důležité, aby měl dostatečnou přesnost a zároveň nedocházelo k velkému zvlnění.



Obr. 4.1 Umístění dílů na karoserii [1]



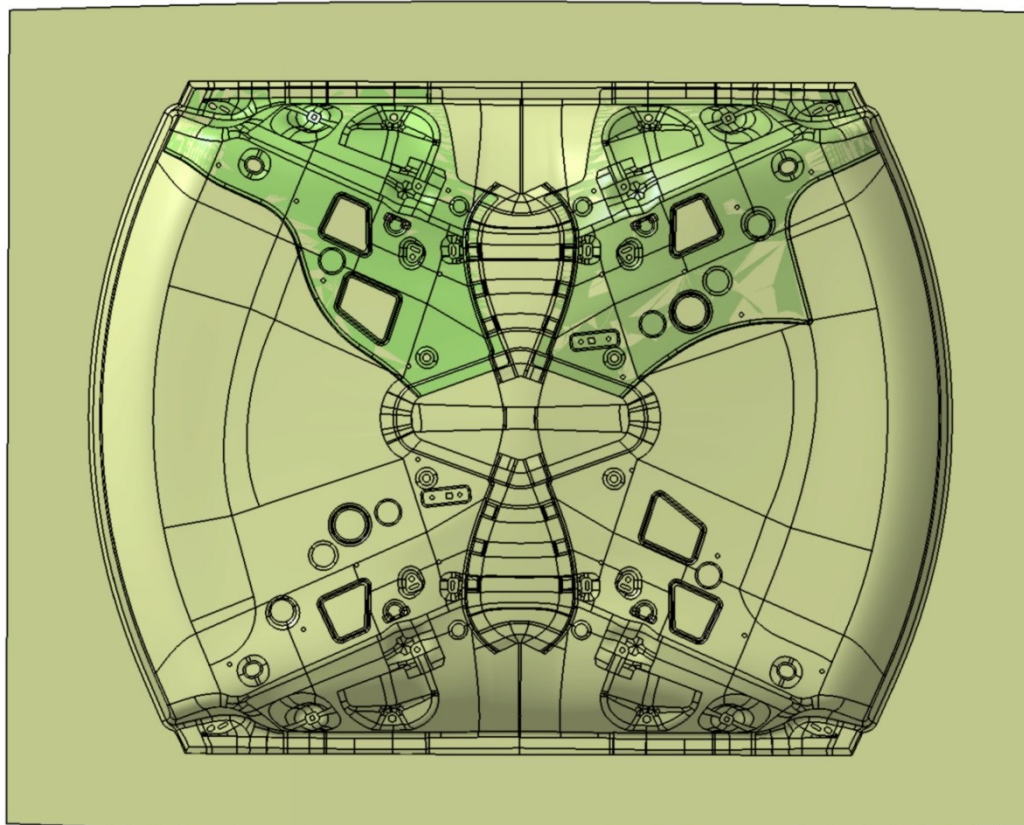
Obr. 4.2 Díl pro levou stranu karoserie [1]



Obr. 4.3 Díl pro pravou stranu karoserie [1]

Oba dva díly budou vyráběny z již dříve uvedeného materiálu DX56D+Z100MB o tloušťce materiálu 0,8 mm. Jak je z obrázků 4.2 a 4.3 patrné, díly jsou si tvarově podobné i když se nejedná o shodný díl, pro operaci lisování je zde jen velmi málo rozdílů.

Z každého nástřihu budou vyráběny celkem 4 díly, dva díly pro každou stranu. Toto byl požadavek zadavatele, z důvodu co největšího využití materiálu a strojů ve výrobě. Tento požadavek však poměrně zkomplikoval konstrukci nástroje. Shodné díly jsou umístěny úhlopříčně vůči sobě, viz obr. 4.4. Tato práce se bude zabývat pouze tažením, tzn. pouze první operací.



Obr. 4.4 Model pro tažení s vyznačením původních dílů

Pro simulaci je také třeba zvolit vlastnosti vybraného materiálu. Tato data jsou zjištěna především zkouškou tahem a po zpracování výsledků je možné hodnoty použít pro simulaci. Pro tuto práci byla data dodána zadavatelem zakázky, a proto nebylo nutné je zjišťovat. Následně jsou ukázány parametry materiálu tak, jak jsou zadány do programu Autoform.

Material name  
Name:

Set defaults for

Comments - right click to view  

Standard designation:  
According to standard:  
Additional designations:

Elasticity / weight  
Young's:   
Poisson's:   
Specific weight:

Hardening curve

Yield surface

FLC

$\sigma_0$ : 140.7     $n$ : 0.282  
 $R_m$ : 310.0     $R_G$ : 0.221

$r_m$ : 1.71

☐ Thickness dependency  
Reference thickness:

$\epsilon_{10}$ : 0.385

Obr. 4.5 Materiálový list programu Autoform

Na obrázku 4.5 je zřejmé, jak vypadá materiálový list v programu Autoform a následně jsou ukázány jednotlivé parametry, které se do simulace zadávají.

Elasticity / weight	
Young's:	2.1e+05
Poisson's:	0.3
Specific weight:	7.8e-05
<a href="#">Thermal properties ...</a>	

Obr. 4.6 Parametry materiálu – elasticita a hmotnost

Z obrázku 4.6 je patrné, že je třeba nadefinovat Youngův modul pružnosti (též nazývaný jako modul pružnosti v tahu), ten vypovídá o možnostech deformace a pevnosti materiálu. Čím vyšší je jeho hodnota, tím je potřeba vyšší napětí pro dosažení stejné deformace. Tato konstanta se běžně označuje písmenem ***E***. Vzorec pro výpočet zní:  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$  kde:

$\sigma$ .... Napětí v tahu

$\varepsilon$ .... Poměrné prodloužení

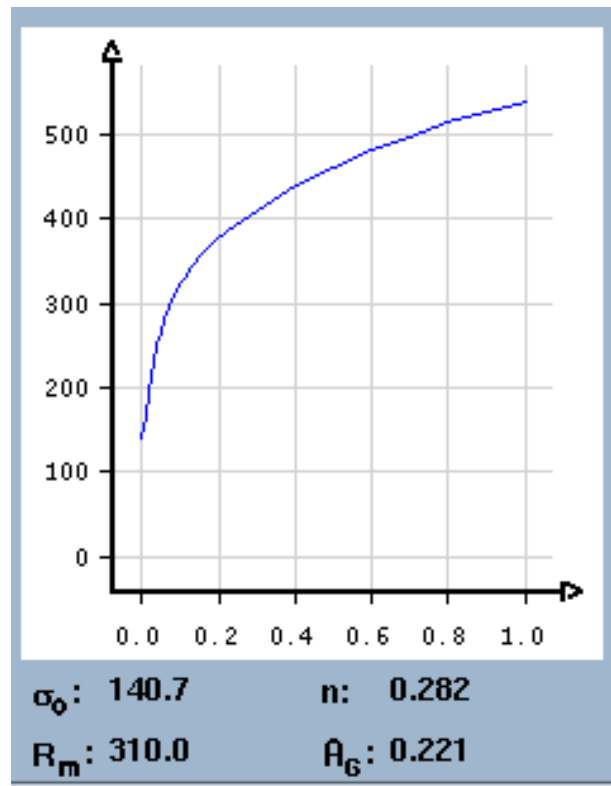
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$\Delta l$  ... prodloužení materiálu

$l_0$  ... původní délka

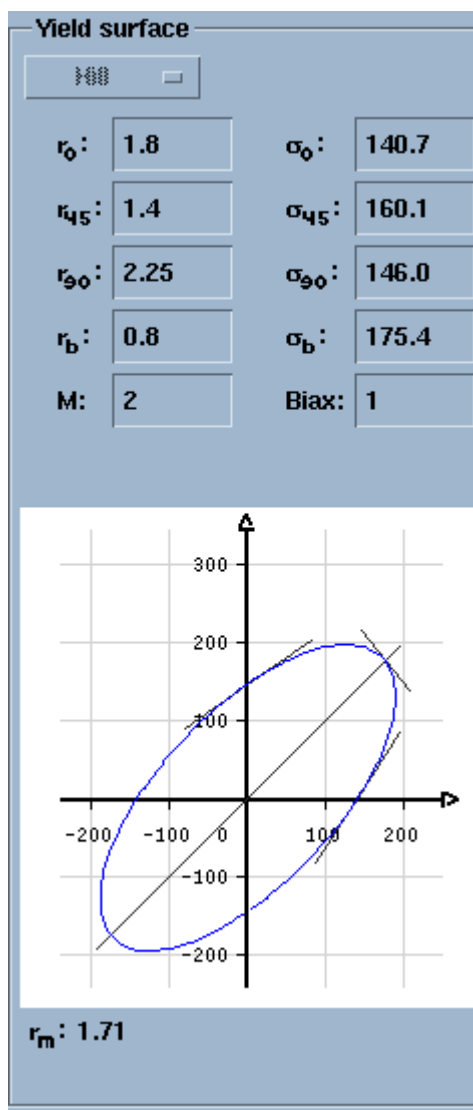
Dále je třeba zadat Poissonovo číslo, které popisuje závislost poměrných prodloužení v ose x a y. Tato konstanta se označuje obvykle písmenem  $\mu$ . Jako poslední je třeba zadat hustotu materiálu.





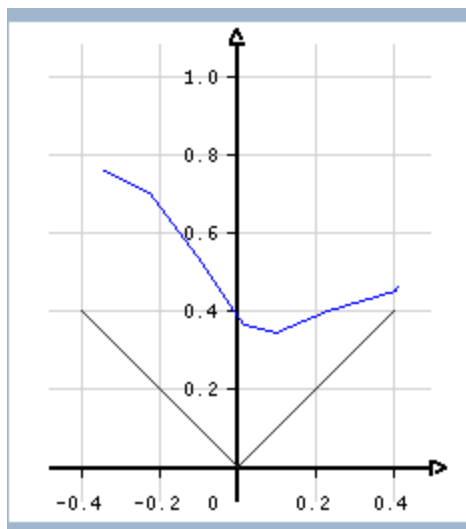
Obr. 4.7 Parametry materiálu – křivka zpevnění

Na obrázku 4.7 je zobrazena křivka zpevnění daného materiálu. Důležité je, aby křivka byla extrapolovaná až do hodnoty přetvoření 1. Dále jsou zde uvedeny aproximované hodnoty skutečného napětí  $\sigma_0$ , smluvní meze pevnosti  $R_m$ , exponentu deformačního zpevnění  $n$  a homogenního tažnost  $A_6$ .



Obr. 4.8 Parametry materiálu – křivka plasticity

Obrázek 4.8 zachycuje křivku plasticity. Tato křivka definuje napětí, při kterém dochází k tečení materiálu. Pro tento případ byl využit model Hill, který podmínku plasticity popisuje jako kvadratickou funkci. Pro použitý model je potřeba zadat hodnoty normálové anizotropie  $r$ , pod úhly 0,45 a 90 stupňů vzhledem ke směru válcování. Tento model je také ovlivněn mezí kluzu. Parametr  $r_b$  je hodnota normálové anizotropie při dvojosém stavu napjatosti,  $r_m$  je vypočítaná střední hodnota. Skutečné napětí  $\sigma$  pod úhly a opět hodnotu  $\sigma_b$ , což je napětí při dvojosém stavu napjatosti. **Biax** je parametr, který ovlivňuje tvar elipsy. Čím je číslo větší, tím více je elipsa protažena. Další je automaticky počítaný parametr **M**.



Obr. 4.9 Parametry materiálu – křivka mezního přetvoření

Obrázek 4.9 zobrazuje křivku mezního přetvoření pro daný materiál. Pomocí tohoto diagramu lze určit případy, které mohou vést k porušení materiálu během lisování.

Všechny tyto parametry by měly vést k co nejpřesnějšímu výsledku simulace. Jejich nastavení může velmi ovlivnit výsledek simulace při porovnání se skutečností.

Následně budou popsány další potřebné parametry pro simulaci:

- Volba nástřihu - především jeho velikosti a tloušťky plechu. Dále se volí směr válcování a osy symetrie
- Definice nástroje – tažníku, tažnice a přidržovače
- Použití brzdících drážek – není třeba, aby byli součástí nástroje, stačí jejich brzdící účinek zadat pomocí parametrů
- Definice podmínek tření – volba mazání apod.

Po zadání všech parametrů si program vytvoří síť trojúhelníků, která slouží pro samotný výpočet a je možné definovat množství použitých trojúhelníků. Čím je větší množství, tím je přesnější výpočet, ale zároveň je potřeba více času pro jeho zpracování.

## 5. Vlastní postup návrhu tahového modelu

V následující kapitole bude popsána samotná tvorba modelu pro tažení výlisku z plechu. Tahový model slouží jako výchozí data pro tvarovou část lisovacího nástroje a také jako vstupní data pro výpočty simulací a následně k tvorbě metodického plánu a CNC programu. Vývoj modelu není úplně jednoduchý a dá se tak předpokládat, že model se bude vyrábět v několika krocích, kde při každém kroku dojde k určité úpravě modelu podle výsledků simulace tažení.

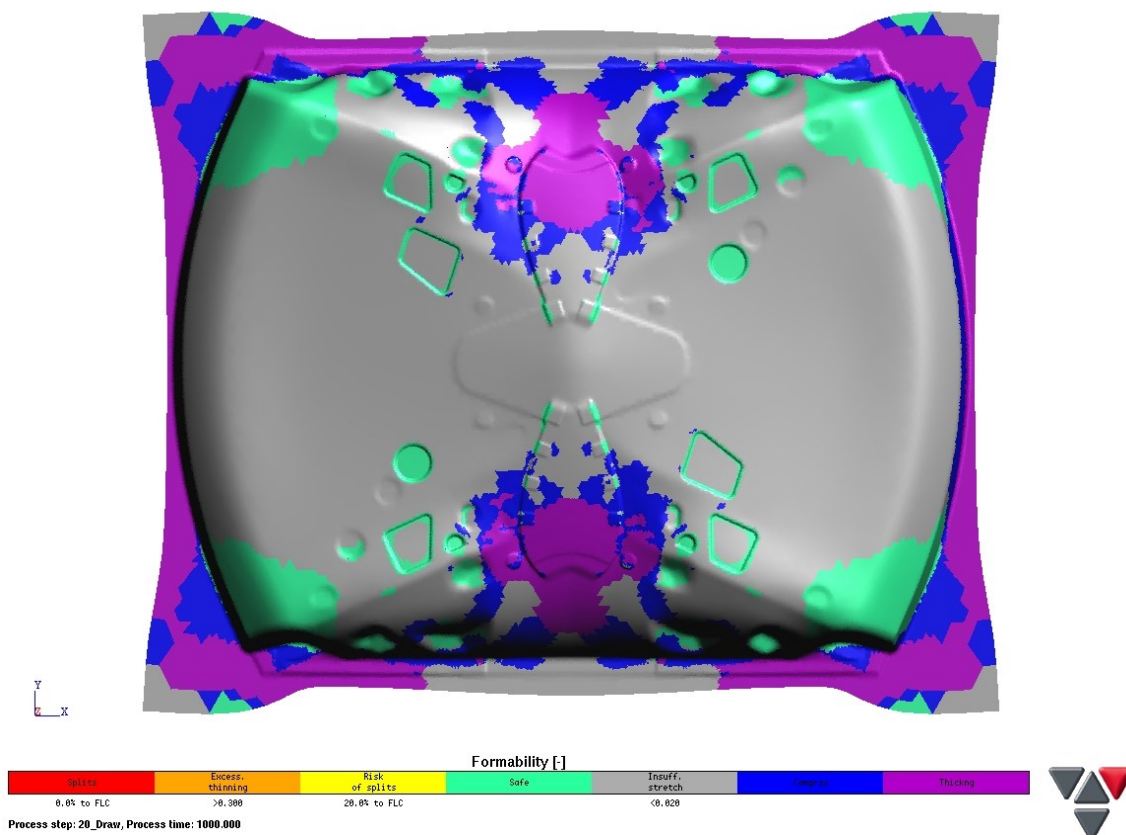
Již na začátku konstrukce nástroje bylo rozhodnuto, že vzhledem ke složitosti vyráběného plechu bude nástroj využívat přídržovač. Ten by měl zaručit menší zvlnění výlisku. Dále, pokud to bude možné, by se měl výrobek lisovat na jeden tah. Tzn. že by na nástroji měla být pokud možno co nejmenší hloubka tahu tak, aby nedošlo k vyčerpání plastičnosti materiálu.

### 5.1 První simulace

Tvorba modelu pro první simulaci spočívala především v ustavení všech dílů do vhodné pozice vůči sobě, vyplnění otvorů, spojení všech dílů a vytvoření plochy pro přídržovač. Při tom bylo potřeba zvolit vhodné uspořádání tak, aby bylo možné materiál přenášet mezi stroji, ostříhnout a aby na dílu nevznikaly takzvané záporné úhly, které by znemožnily lisování. Nabízelo se několik různých variant ustavení plechů, ale jako nejlepší bylo zvoleno to, které již bylo zobrazeno na obr. 4.4. v předchozí kapitole. Tyto dva díly, již ustavené vůči sobě, se kolem pomyslné osy lisování otočily o  $180^\circ$ , tak aby byly umístěné všechny 4 kusy materiálu. Toto uspořádání bylo vybráno jako nejvhodnější pro danou úlohu a po konzultaci došlo k rozhodnutí pro jeho použití. Následně bylo potřeba rozvinout ohnuté plochy, aby bylo možné zjistit předpokládanou vzdálenost dílů od sebe. Při tomto kroku bylo potřeba myslet na to, aby mezi díly zůstala dostatečná mezera na ostříhnutí plechů a přenášení jednotlivých kusů mezi stroji. Tato operace však nebyla jednoduchá a zabrala poměrně

velmi mnoho času. Následovalo vytvoření plochy pro přidržovač a spojení dílů s touto plochou. Byla zvolena rovinná plocha, která by měla poskytnout dostatečnou sílu na přidržení materiálu.

Následovalo vložení dat do programu Autoform a nastavení jednotlivých parametrů potřebných pro simulaci uvedených v předchozí kapitole. V dalších několika krocích docházelo k doladění procesu lisování pomocí změny síly přidržovače a velikosti nástřihu tak, aby vznikl pokud možno co nejlepší výsledek simulace.



Obr. 5.1 Tvářitelnost – první simulace

Na obrázku 5.1 je patrné, že výsledek simulace není optimální, díl téměř celý není vypnutý (což je znázorněno šedou barvou, zelená značí bezpečné tažení, fialová zvlnění, modrá riziko zvlnění, žlutá riziko vzniku trhliny, oranžová nadměrné ztenčení a červená označuje trhliny).

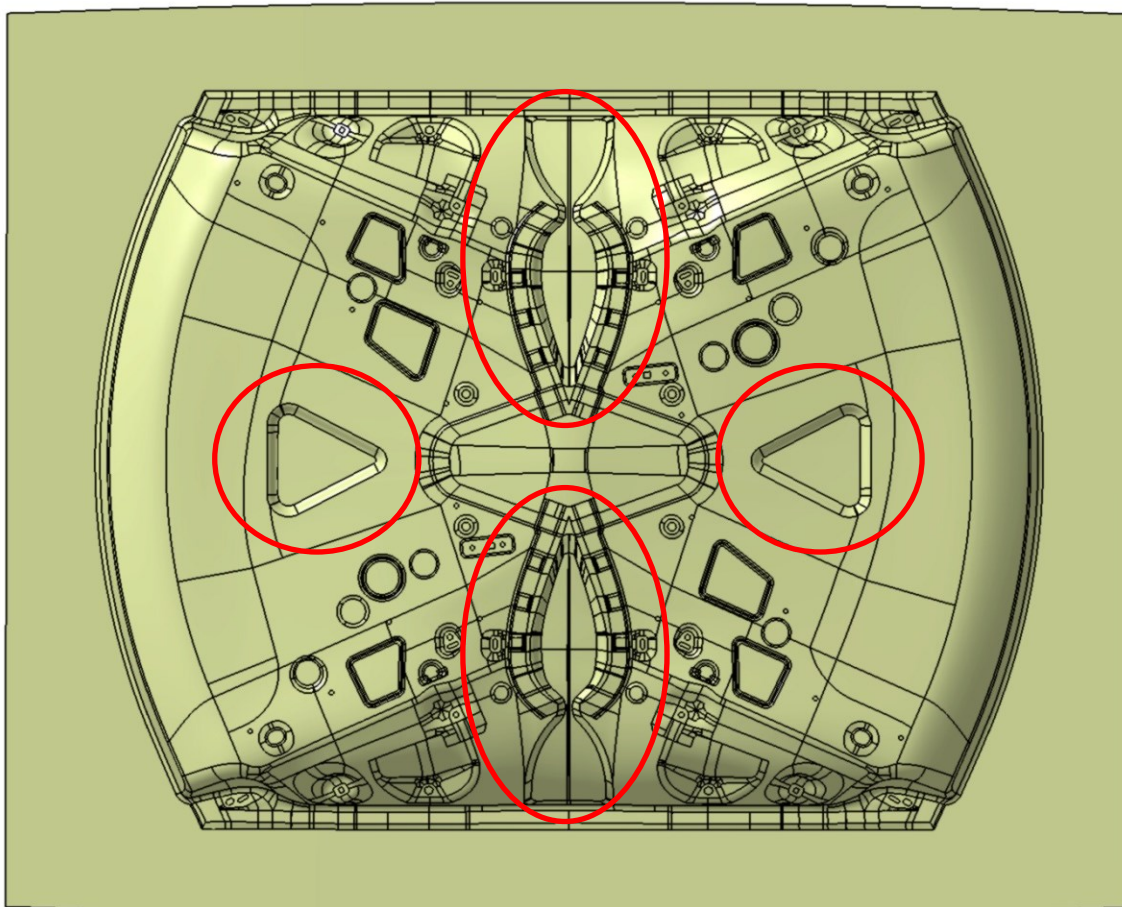
K výsledkům jsou v příloze k dispozici obrázky ukazující ztenčení materiálu, riziko vzniku trhliny a velikost zvlnění.

Na obrázku je také patrné, že dochází k velkému zvlnění materiálu (v oblastech, kde se střídá komprese a ztenčení materiálu), maximální hodnota je 0,18 mm a dochází k němu mimo díl, kde by maximální hodnota měla být 0,07 mm (tato hodnota je zvolena s ohledem na opotřebení nástroje, při větším zvlnění dochází k vydírání raznice). Nejvyšší ztenčení je 18,5% a maximální riziko vzniku trhliny je 62%, tyto dvě hodnoty jsou v mezních hodnotách. Nejvyšší povolená hodnota ztenčení je kolem 30% a riziko vzniku trhliny je cca 80%. Nástrih materiálu byl obdélníkového tvaru o rozměrech 1460x1200 mm.

Potřebná síla lisu, která je vypočítána programem Autoform, je přibližně  $2,9 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1 \times 10^6$  N.

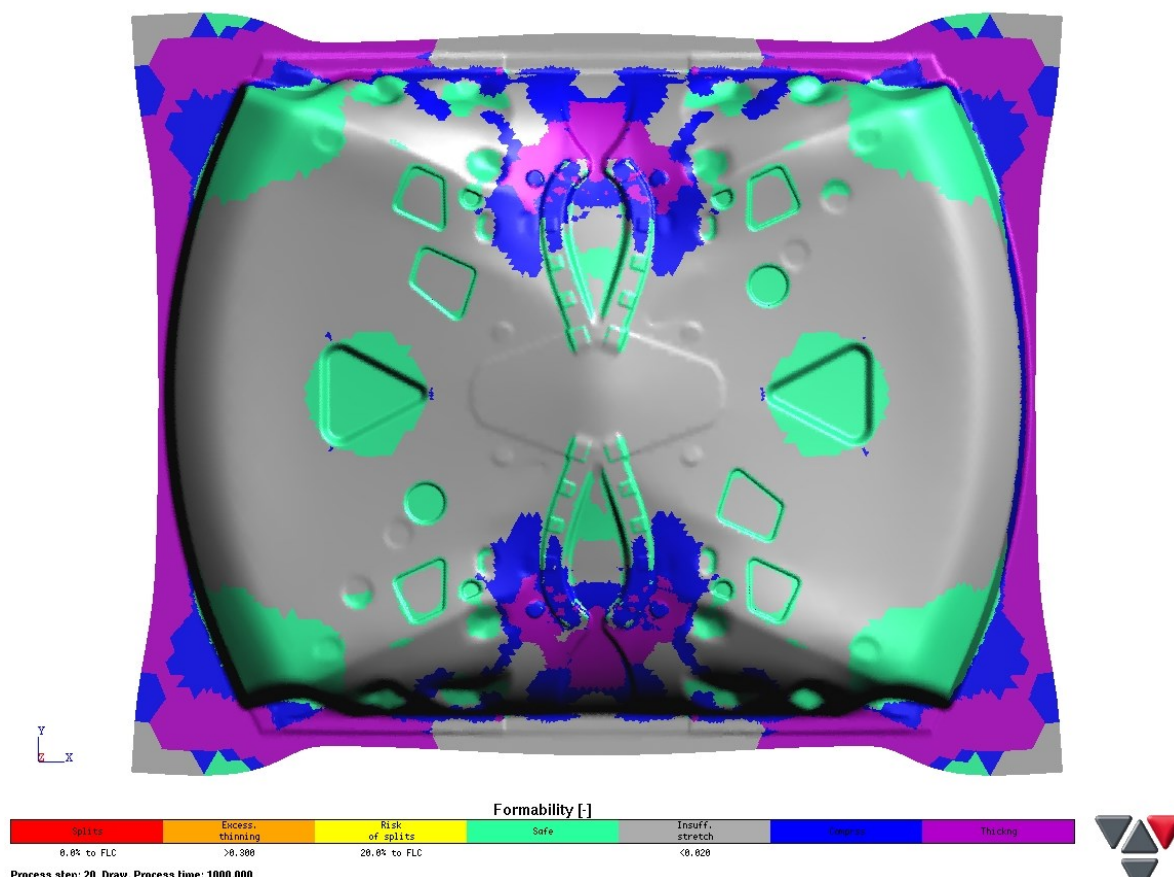
## 5.2 Druhá simulace

V druhé simulaci došlo k úpravě tvaru samotného tahového modelu, kde se vytvořily prolisy v označených místech, které by měly pomoci k lepšímu vylisování dílu, viz. obr. 5.2. Do těchto prolisů by se měl „vtáhnout“ materiál a tím by se měla dolisovat vrchní část modelu. Bylo samozřejmě potřebné vyzkoušet optimální tvar jednotlivých prolisů. Jak je na obrázku patrné, prolisy označené oválem byly omezeny především tvarem dílů. Zde bylo potřeba pouze zvolit optimální hloubku prolisů. V prolisech označených kruhy bylo možné tvar relativně vytvořit dle vlastního uvážení. Hloubka byla opět volena podle výsledků simulace tak, aby nedocházelo ke zvlnění dílu a zároveň prolisy plnily svoji funkci.



Obr. 5.2 Tahový model – druhá simulace

Opět následovalo vložení dat do programu Autoform, úprava procesu lisování a také změna tvaru nástroje.



Obr. 5.3 Tvářitelnost – druhá simulace

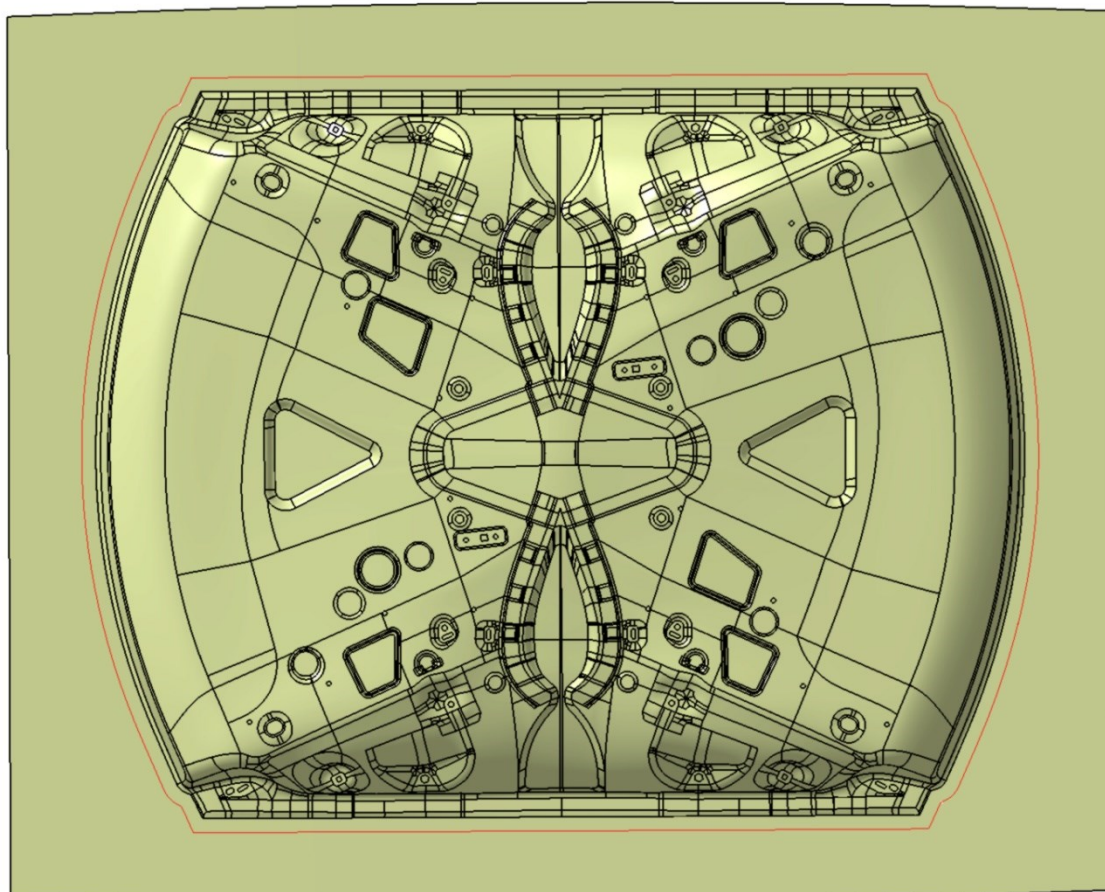
Jak je u obr, 5.3 patrné, došlo pouze k minimálnímu zlepšení výsledku simulace. Plech je stále nevytažený a stále dochází k velmi velkému zvlnění. Vytvořené prolisy téměř nepomohly, přesto však k mírnému zlepšení došlo. Riziko vzniku trhliny je 63%, ztenčení je 18% a zvlnění stále vysokých 0,18mm. Nástřih materiálu zůstal shodný.

Potřebná síla lisu je přibližně  $3,4 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1 \times 10^6$  N.



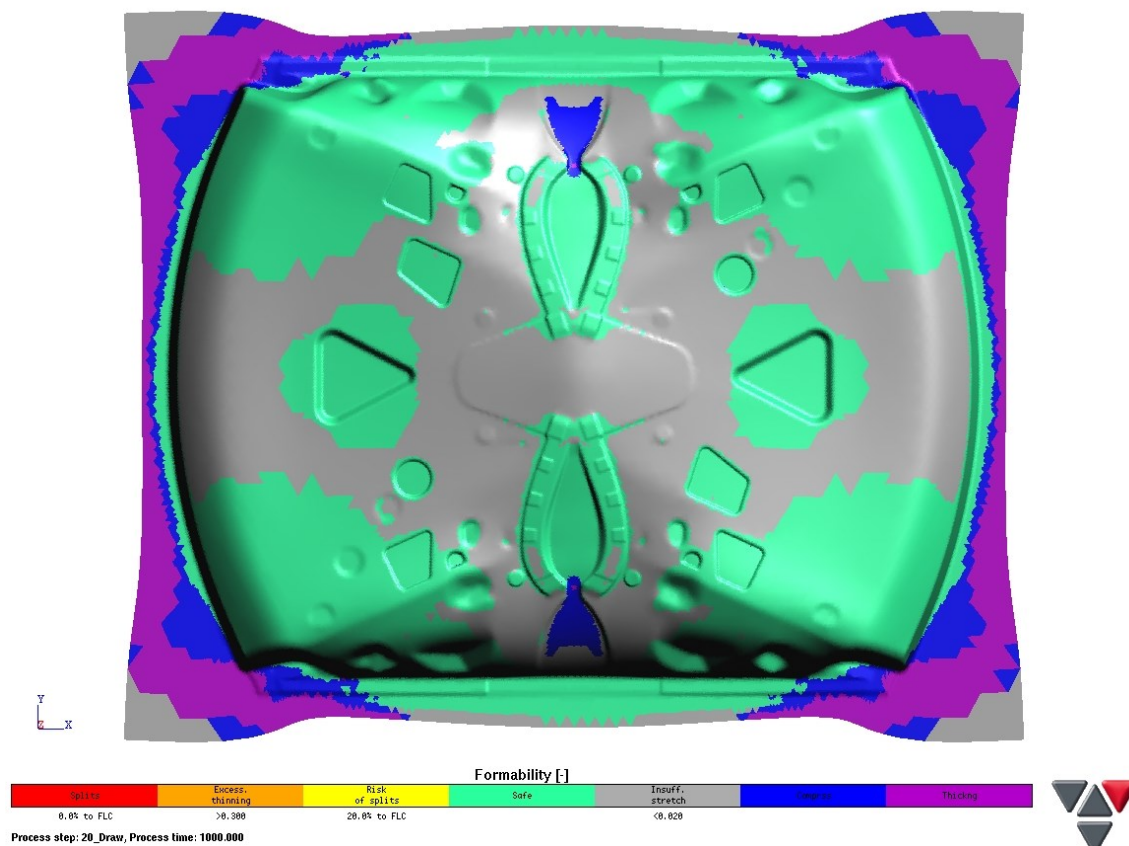
### 5.3 Třetí simulace

Na základě dat z druhé simulace došlo k rozhodnutí vytvořit brzdící drážku kolem celého dílu, která by měla pomoci více brzdit materiál, který je vtahován z plochy pod přidržovačem mezi tvarové plochy nástroje. To by mělo zaručit lepší vytažení dílu v horní ploše, která byla v předchozí simulaci zcela nevytažená. Drážka se do Autoformu zadává pouze jako křivka a nadefinuje se hodnota, jak velkou silou drážka brzdí. Je možné zvolit drážku s konstantní brzdou silou či nadefinovat proměnnou sílu. Síla brždění se mění tvarem drážky, v základu je na výběr mezi půlkulatou drážkou nebo tvarem U. Jak vypadala zvolená křivka je vidět na obrázku 5.4, kde je zvýrazněna červenou čarou.



Obr. 5.4 Tahový model – třetí simulace

Následovalo zanesení brzdící drážky a postupná optimalizace velikosti brzdící síly, podle výsledků simulací.



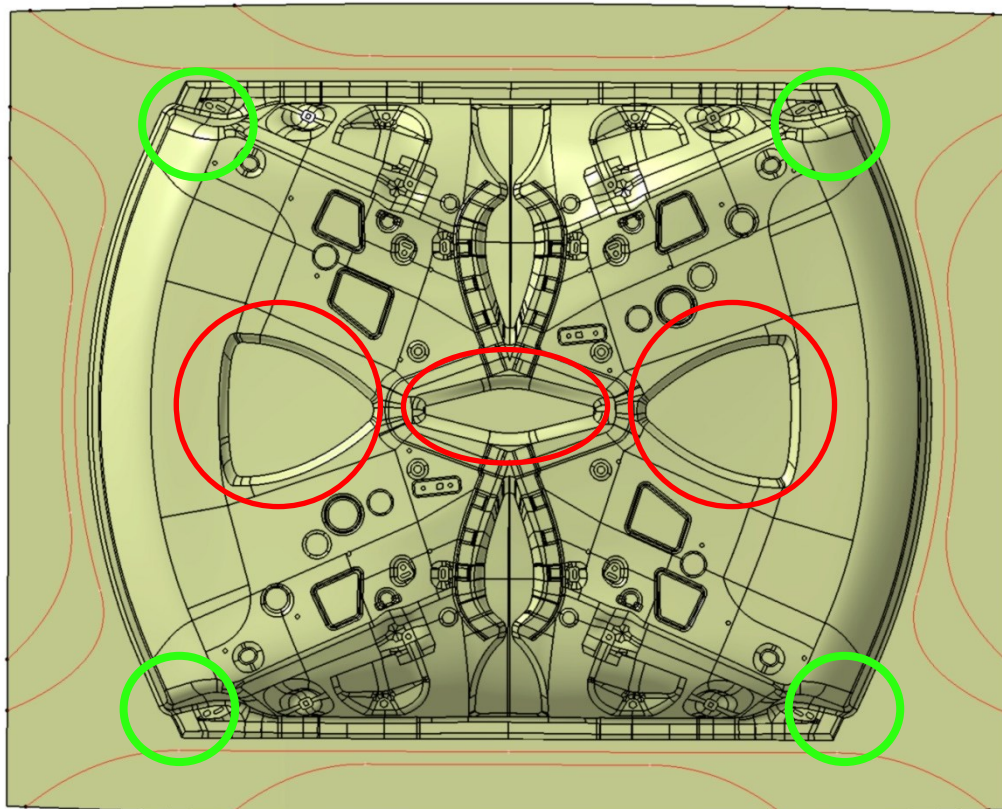
Obr. 5.5 Tvářitelnost – třetí simulace

Z obrázku 5.5 je vidět, že použití brzdné drážky pomohlo. Díl je daleko více vytažený, ale brzdnou sílu nelze nadále zvyšovat. Riziko vzniku trhliny je 76%, ztenčení je 23% a zvlnění stále vysokých 0.16mm. Bohužel se zde nachází oblasti, kde je potřeba začít hlídat výlisek tak, aby nedošlo k jeho poškození během výroby. Na druhou stranu zvlnění stále zůstává velmi vysoké, i když se mírně zmenšilo. Nástřih materiálu byl z důvodu použití drážky změněn na rozměr 1500x1220 mm. Zvětšení nástřihu bylo nutné pro zajištění stability procesu tažení. Při vtažení hrany nástřihu do brzdné drážky nelze tuto podmínku dodržet.

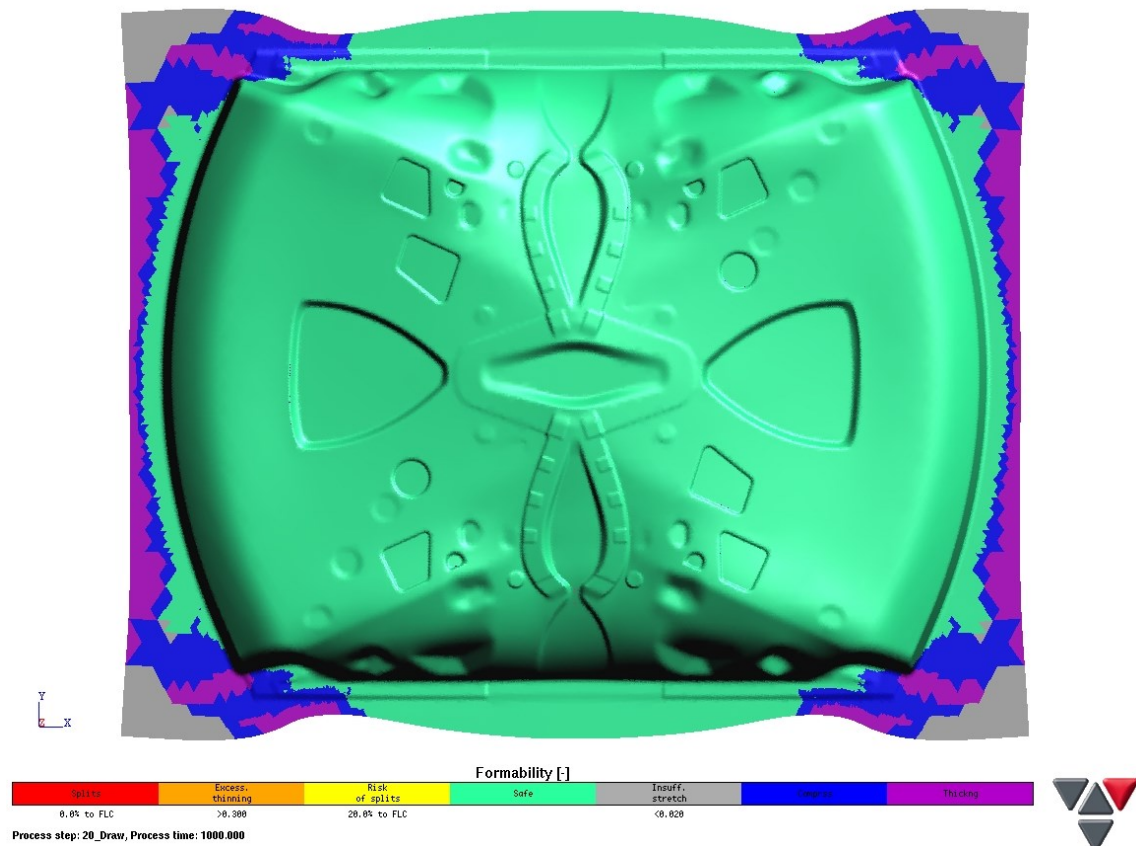
Potřebná síla lisu je přibližně  $4 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,2 \times 10^6$  N.

#### 5.4 Čtvrtá simulace

V dalším kroku se upravil díl samotný, byl vytvořen středový prolis (ten byl opět omezen tvarem dílů) a zvětšily se již vytvořené prolisy, ale byl upraven i tvar a množství brzdících drážek. Toto by mělo zajistit lepší vylisování dílu a zároveň snížit zvlnění. Materiál by měl totiž lépe „téci“ přes rádiusy na nástroji (označeno zeleně). Vše je zobrazeno na obrázku 5.6 .



Obr. 5.6 Tahový model – čtvrtá simulace



Obr. 5.7 Tvářitelnost – čtvrtá simulace

Na obr. 5.7 je zřetelně vidět, že provedené úpravy výrazně pomohly, díl je celý vytažený, ale stále dochází k velmi vysokému zvlnění.

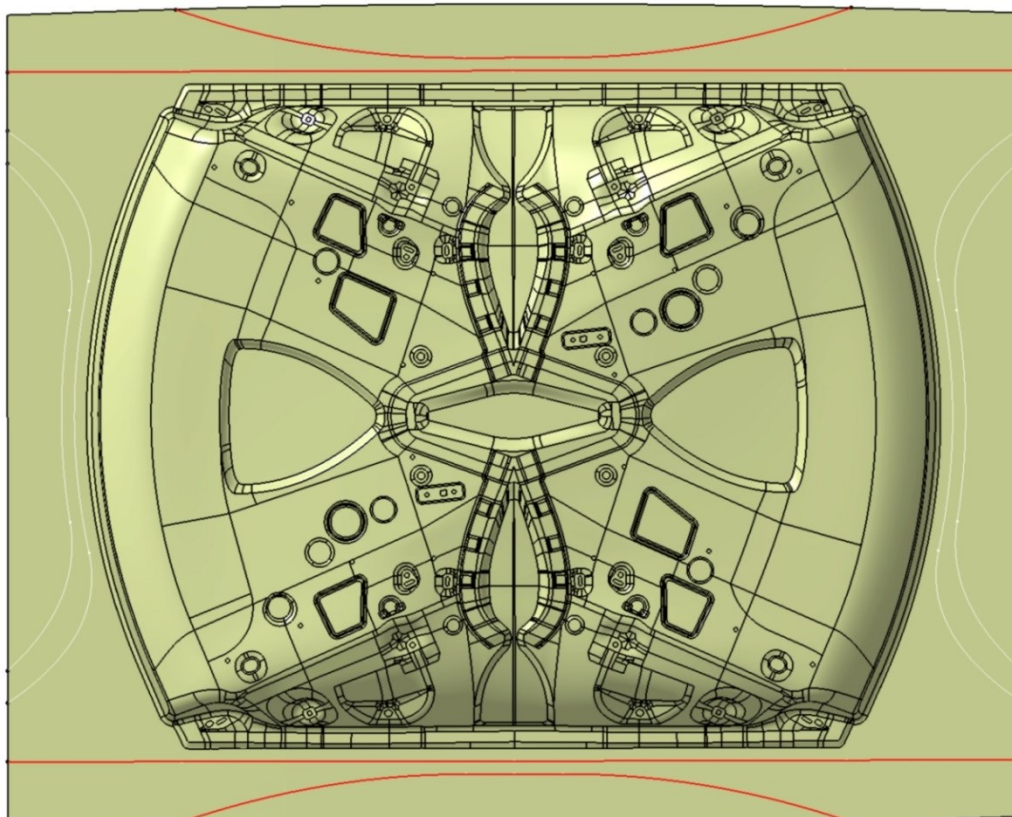
Riziko vzniku trhliny je 81%, ztenčení je 27% a zvlnění stále vysokých 0,154mm. Nástřih materiálu byl zmenšen na 1500x1190 mm.

Potřebná síla lisu je přibližně  $4,5 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,15 \times 10^6$  N.

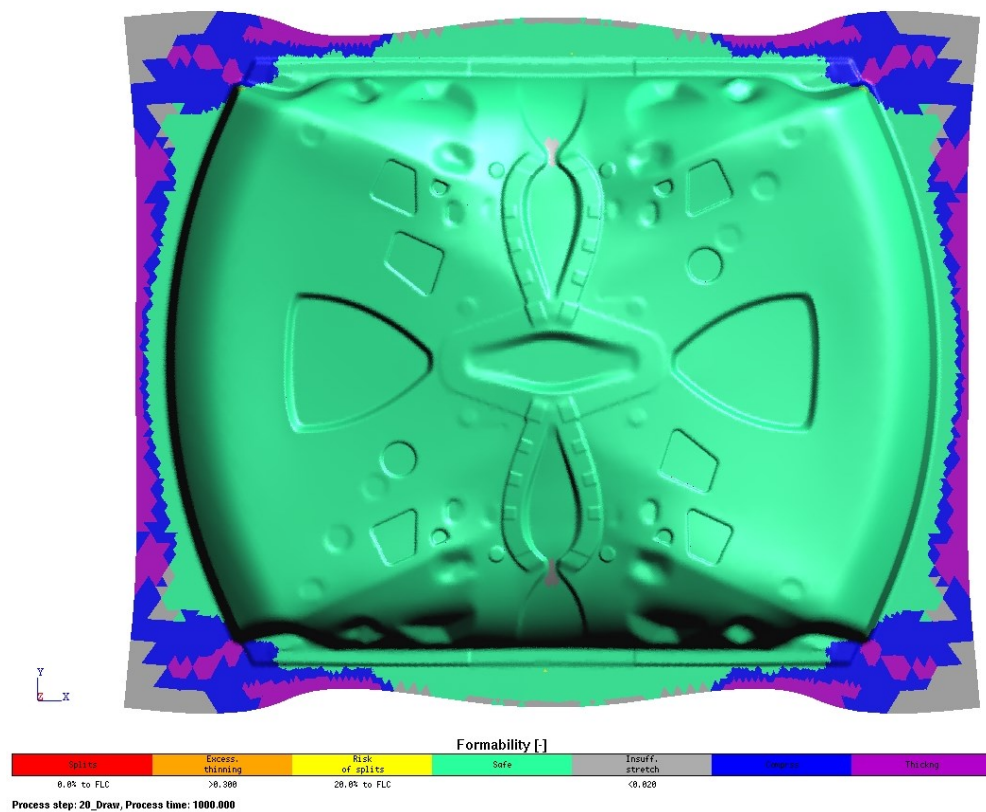
## 5.5 Pátá simulace

Pro další simulaci došlo pouze k úpravě tvaru brzdících drážek, které by měly zaručit menší zvlnění výlisku. Stejně tak jako v předchozím případě, který nebyl zcela úspěšný, by se mělo docílit toho, že materiál se lépe dostane přes rádiusy nástroje.





Obr. 5.8 Tahový model – pátá simulace



Obr. 5.9 Tvářitelnost – pátá simulace

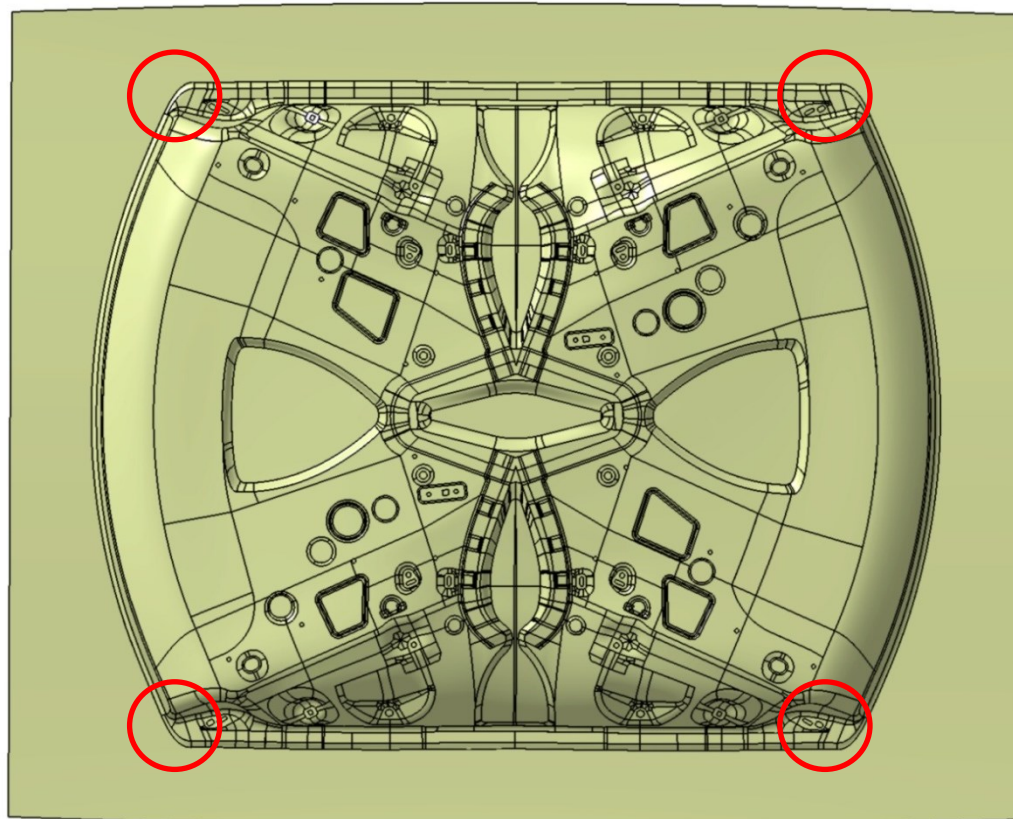
Úpravou tvaru drážek se mírně zlepšily parametry tažení a zmenšilo se zvlnění, ale bohužel zůstává stále vysoké. Na druhou stranu dochází k mírnému nedotažení ve vytvořených prolisech. Došlo také ke zvýšení hodnoty rizika vzniku trhliny.

Riziko vzniku trhliny je 89%, ztenčení je 26% a zvlnění stále vysokých 0,134mm. Nástřih materiálu byl zvětšen na 1500x1210 mm.

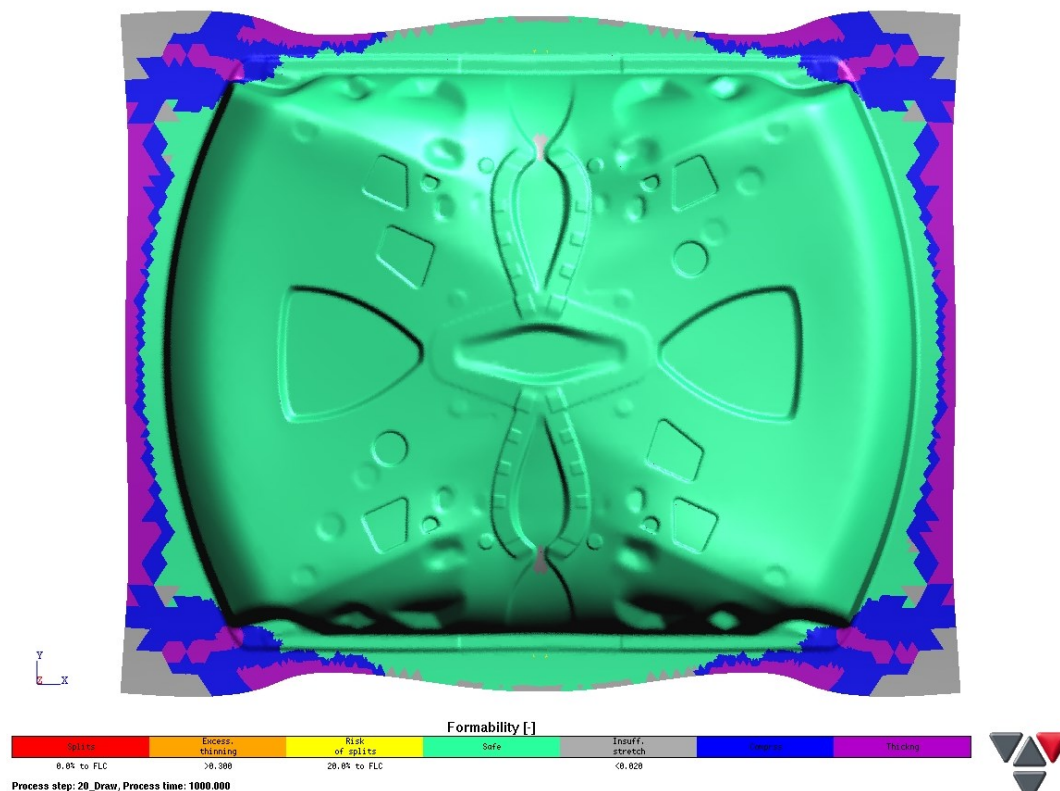
Potřebná síla lisu je přibližně  $4,7 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,2 \times 10^6$  N.

## 5.6 Šestá simulace

V šesté simulaci došlo k přemodelování rohů, viz obr. 5.10 a zároveň ke změně plochy pro přidržovač, která již není rovinná, ale prohnutá. Toto by mělo zajistit zmenšení zvlnění a přitom umožnit lepší posun materiálu po nástroji a také zmenšit hloubku tažení ve střední části nástroje. Pomoci by mělo již samotné prohnutí plechu při upnutí přidržovačem.



Obr. 5.10 Tahový model – šestá simulace



Obr. 5.11 Tvářitelnost – šestá simulace

Výsledek není úplně přesvědčivý, je navíc velmi podobný předchozí simulaci. Stále dochází k velmi vysokému zvlnění.

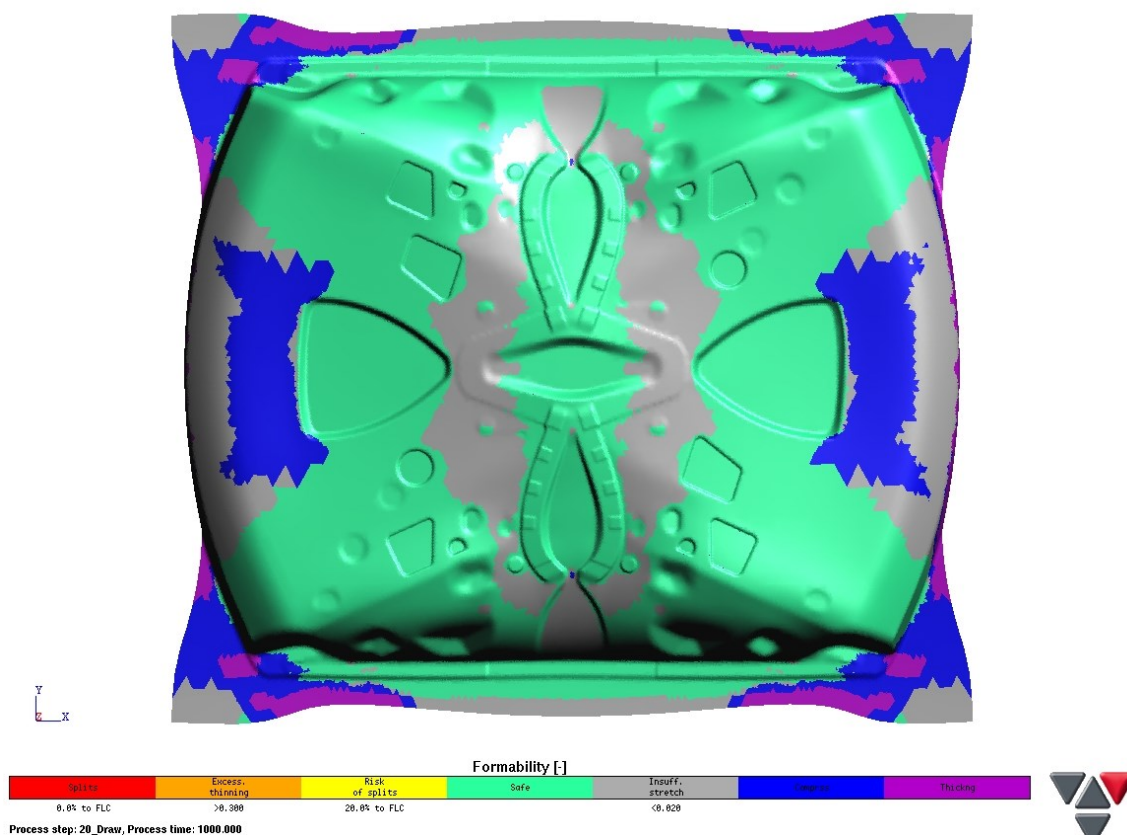
Riziko vzniku trhliny je 81%, ztenčení je 27% a zvlnění stále vysokých 0,145mm. Nástřih materiálu zůstal shodný s předchozím.

Potřebná síla lisu je přibližně  $4,7 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,2 \times 10^6$  N.

## 5.7 Sedmá simulace

V sedmé simulaci došlo ke změně podmínek tažení a bylo rozhodnuto, že se díl následně bude lisovat tzv. na otevřenou hlavu. To znamená, že materiál z boků není pod plochou přidržovače po celou dobu lisování a je brzděn pouze tvarem modelu. Tahový model zůstal stejný, pouze došlo k odstranění bočních drážek a zmenšení nástřihu. V této fázi šlo o pokus, zda bude vůbec možné zvolenou technologii použít





Obr. 5.12 Tvářitelnost – sedmá simulace

Špatný výsledek simulace, viz. obr. 5.12, byl očekávaný, protože tvar modelu nebyl upraven pro zvolenou technologii, díl je nedotažený, vlní se a celkově je velmi špatně vylisovaný. Ale na druhou stranu se ukázalo, že tento krok nebyl úplně nepoužitelný a pokud by došlo k úpravě tvaru nástroje vhodně ke zvolené technologii, mohl by dopomoci ke správnému vylisování výrobku.

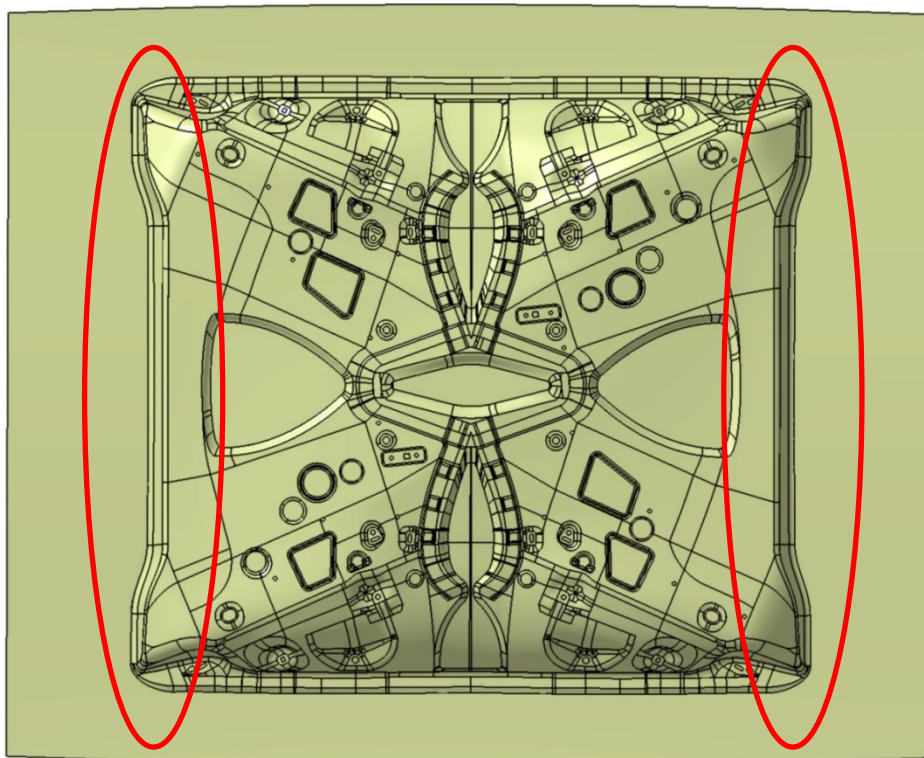
Riziko vzniku trhliny je 78%, ztenčení je 24% a zvlnění stále vysokých 0,11mm. Nástřih materiálu byl zmenšen na 1360x1210 mm.

Potřebná síla lisu je přibližně  $4,3 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,2 \times 10^6$  N.



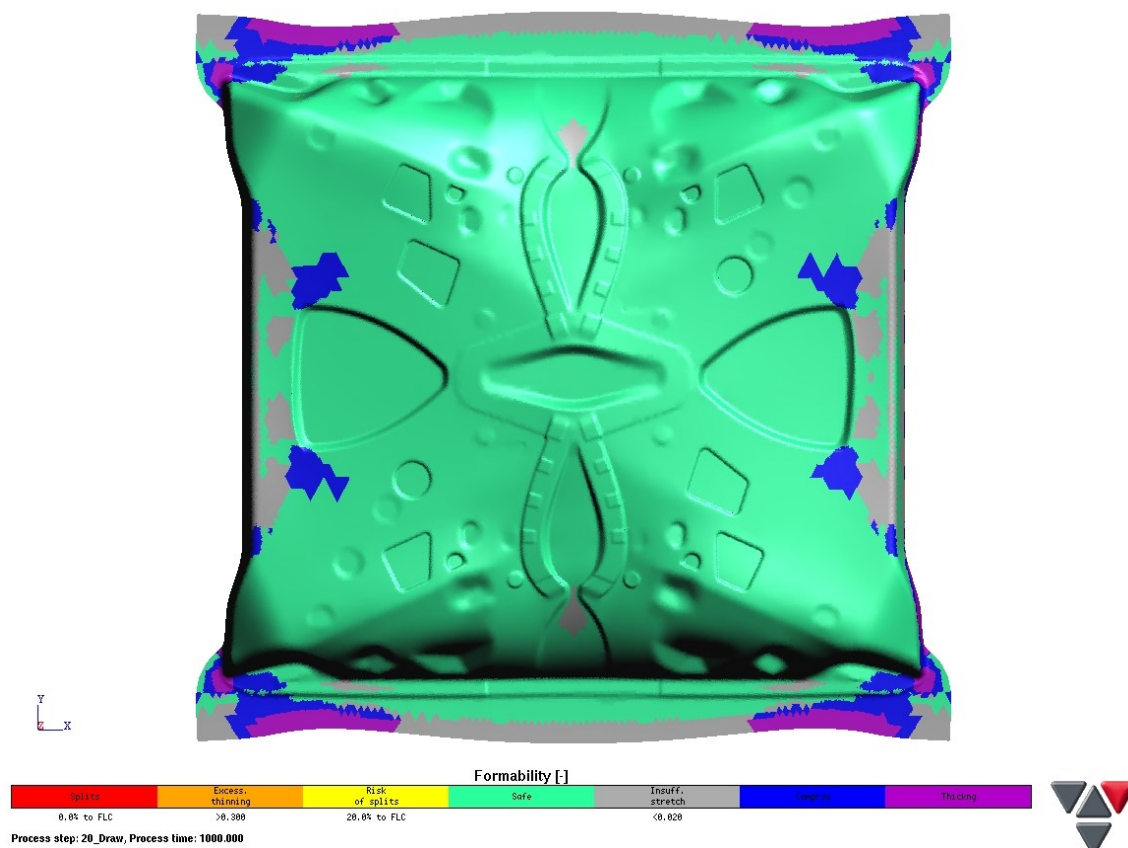
## 5.8 Osmá simulace

V osmé simulaci obr. 5.13 byl upraven model tak, aby lépe vyhovoval zvolené technologii. Došlo k vytvoření bočních prolisů a těmi se nahradily brzdící drážky a zároveň by mělo dojít ke správnému vytažení výtažku. Boční plochy nejsou svislé, ale pod mírným úhlem (cca  $5^\circ$ ) tak, aby bylo umožněno “tečení” materiálu. Ostatní geometrie zůstala shodná jako v předchozím případě.



Obr. 5.13 Tahový model – osmá simulace

..



Obr. 5.14 Tvářitelnost – osmá simulace

Výsledke, viz. obr. 5.14, dopadl relativně pozitivně, ale jak je patrné, budou potřeba ještě poměrně značné úpravy modelu tak, aby simulace byla optimální.

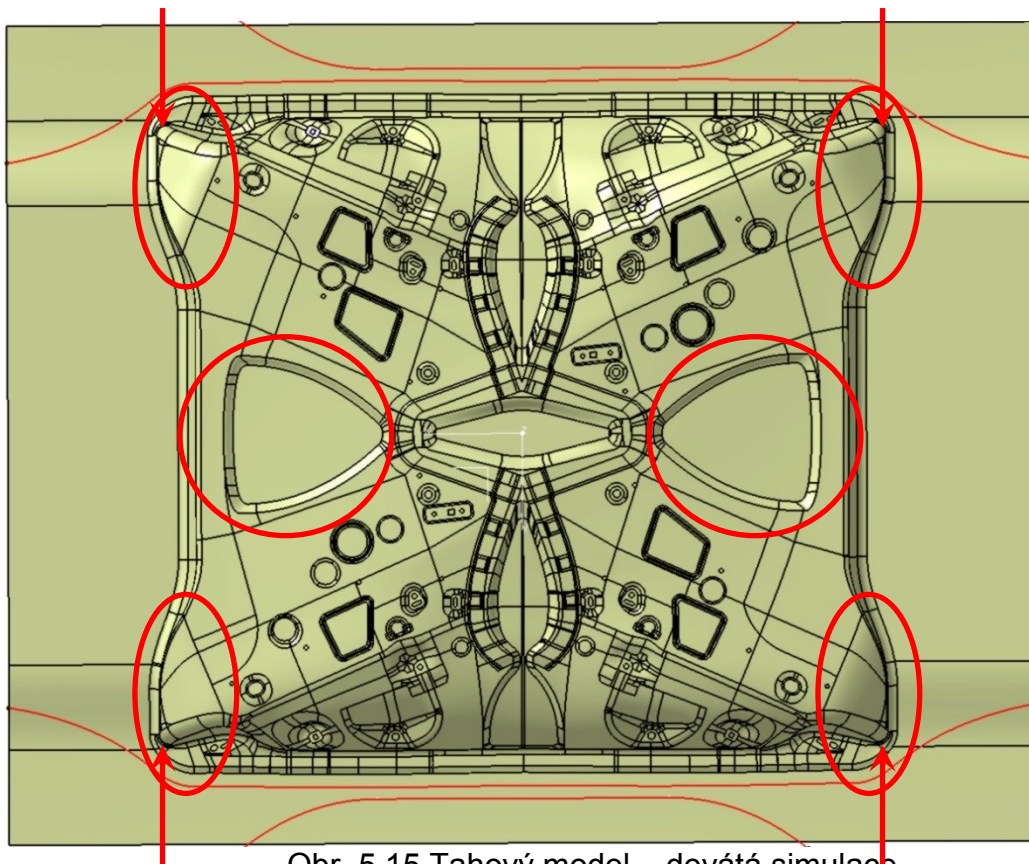
Bohužel opět dochází k velkému zvlnění obdobně jako v předchozích případech.

Riziko vzniku trhliny je 80%, ztenčení je 25% a zvlnění 0,11mm. Nástřih byl zmenšen na 1240x1210 mm.

Potřebná síla lisu je přibližně  $4,3 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,2 \times 10^6$  N.

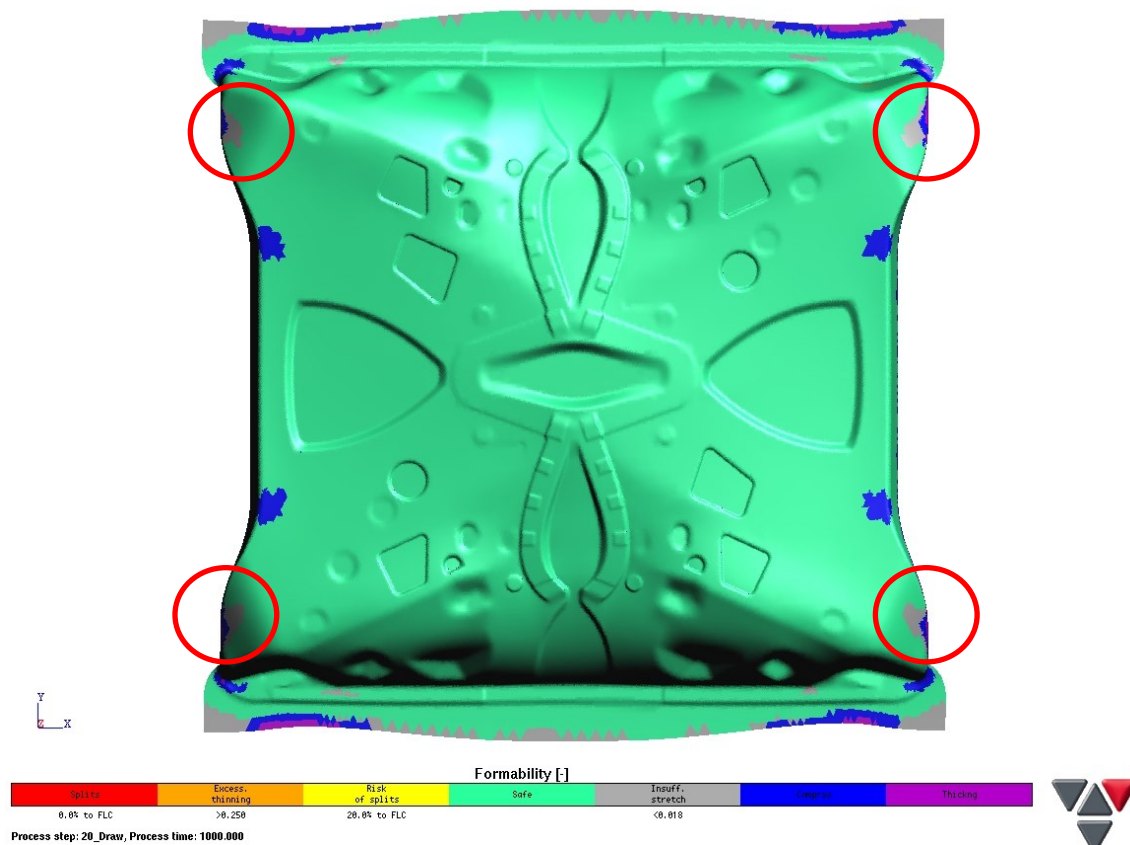
## 5.9 Devátá simulace

Jak bylo naznačeno v předchozí kapitole, model pro devátou simulaci doznal značných úprav.



Obr. 5.15 Tahový model – devátá simulace

Došlo k úpravě tvaru plochy pro přidržovač, která je nyní tvořena ze dvou rovinných ploch spojených k sobě. Tento tvar zajistí, že se plech prohne již při uchycení přidržovačem a zároveň zůstane déle pod přidržovačem ve střední části dílu a také se v této oblasti výrazně zmenší hloubka tažení. Dále se upravily rohy součásti a zmenšila se hloubka středních prolisů mezi díly. V rozích došlo ke zmenšení rádiusu na vrchu součásti, zároveň je boční stěna kolmá. Tyto dvě úpravy by měly zajistit, že materiál bude brzděn samotným tvarem modelu a nebude potřeba využít brzdnu drážku. Také došlo k „rozvolnění“ rádiusu tak, aby nedocházelo ke zvlnění (viz šipky v obr. 5.15). Cílem je zajistit, že se materiál lépe dostane přes rádius nástroje a bude rovnoměrněji vtahován do nástroje. V poslední řadě se také upravil tvar brzdne drážky.



Obr. 5.16 Tvářitelnost – devátá simulace

Jak je patrné z obrázku 5.16, díl je v podstatě celý vytažený, dochází pouze k mírnému zvlnění v horních částech. Tato oblast se však nachází mimo díl. Dále jsou zde oblasti, kde dochází k nedolisování (označeno červeně). Tyto oblasti se nachází v místech, kde v následujících operacích bude vytvořen lem, který se bude kalibrovat, tudíž ani zde není očekáván zásadní problém.

Riziko vzniku trhliny je 78%, ztenčení je 26% a zvlnění 0,066mm. Jak je vidět, poprvé je zvlnění menší než 0,07mm, což se bere jako mezní hodnota. Nástřih materiálu byl zmenšen na 1180x1162 mm.

Potřebná síla lisu je přibližně  $4,5 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,4 \times 10^6$  N.

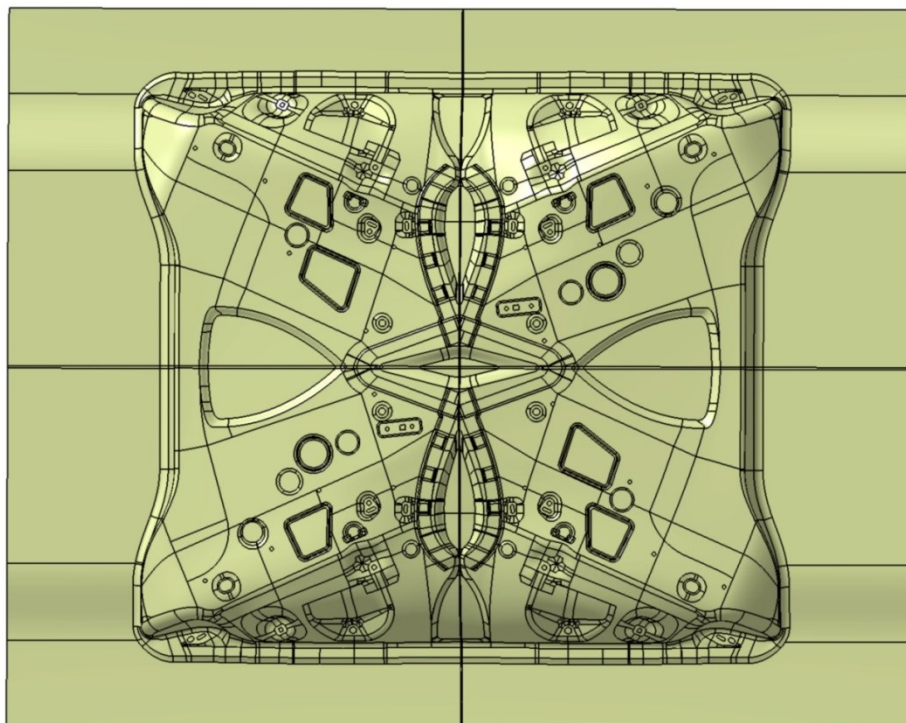


### 5.10 Desátá simulace

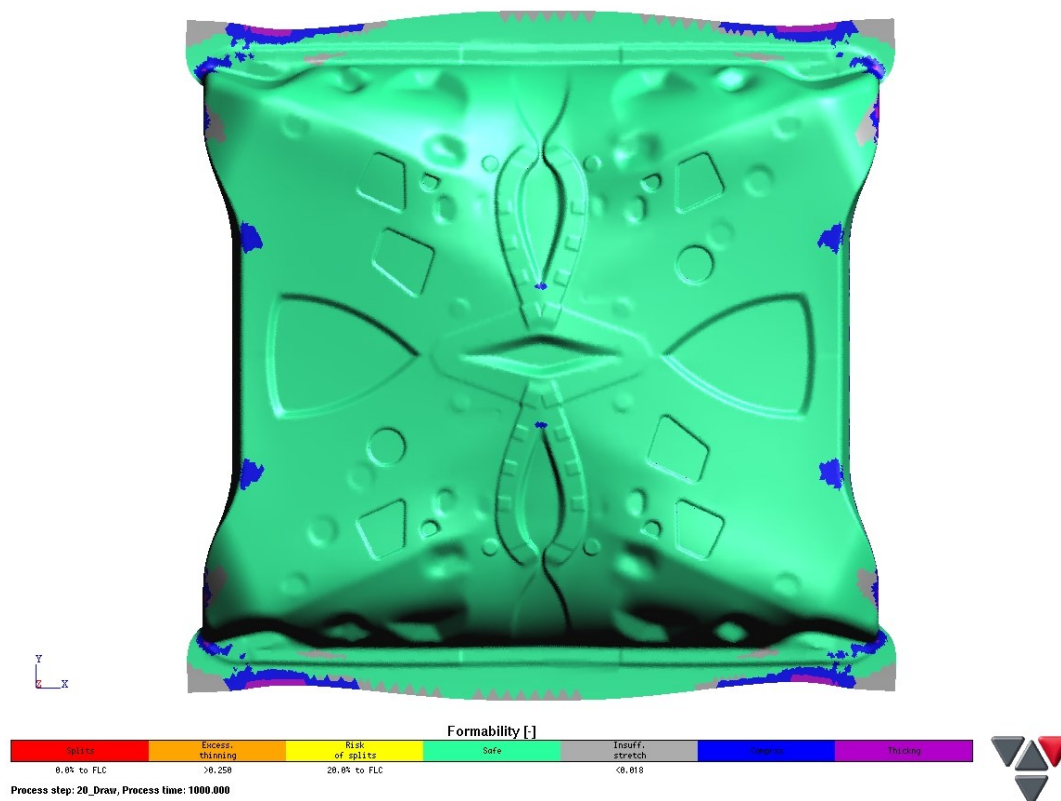
Poslední simulace byla zaměřena na optimalizaci využití materiálu tak, aby díl byl pokud možno stále dobře vylisovaný, ale zároveň aby byla zaručena maximální možná úspora materiálu.

Z obrázku 5.17 je patrné, že došlo k rozříznutí dílu a jeho novému složení s upravenou velikostí.

S tímto bylo spojeno i mírné upravení geometrie, úprava tvaru prolisů apod.



Obr. 5.17 Tahový model – desátá simulace



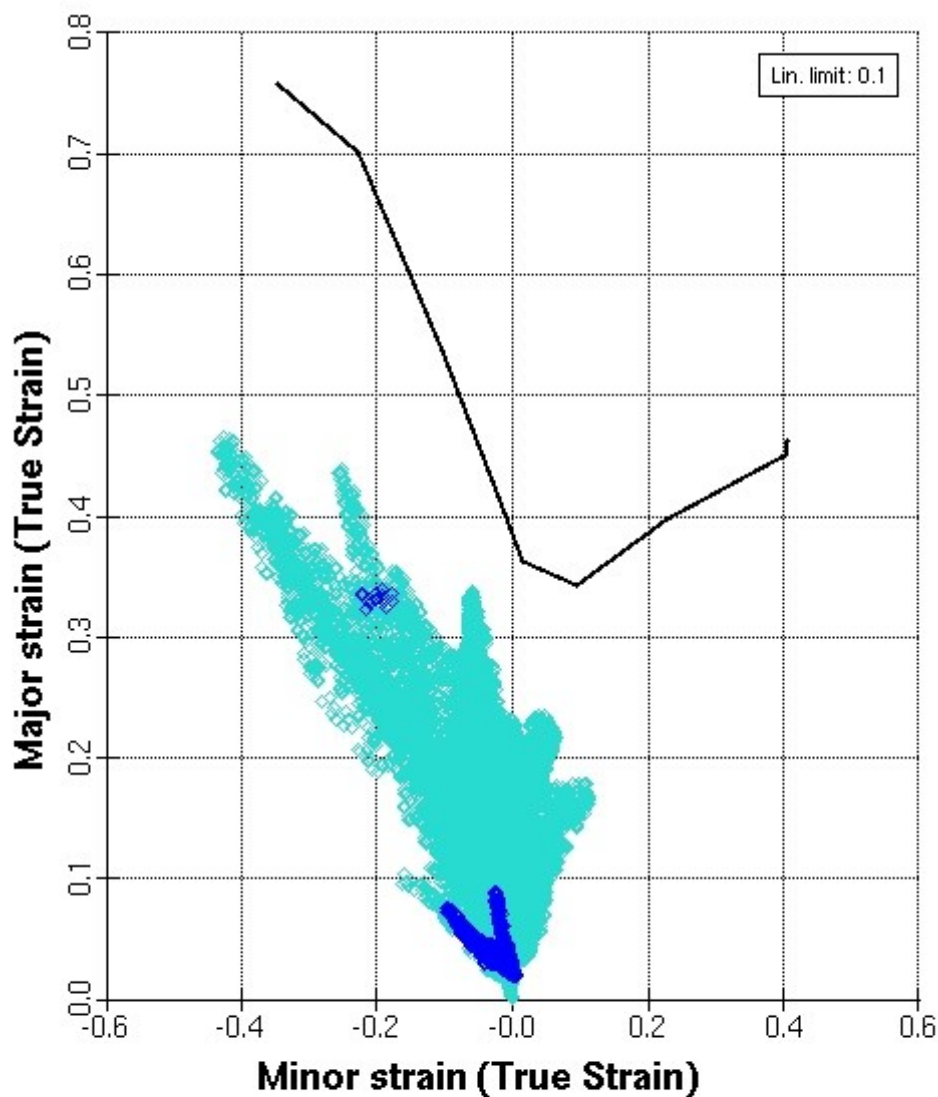
Obr. 5.18 Tvářitelnost – desátá simulace

Výsledek simulace, viz. obr. 5.18 byl vyhovující. Stav zůstal v podstatě shodný s devátou simulací, a přesto došlo k poměrně výrazné úspoře materiálu. I přesto však zůstal dostatek prostoru pro oříznutí a přenášení plechu mezi jednotlivými stroji.

Riziko vzniku trhliny je 71%, ztenčení je 25% a zvlnění 0,07mm. Hodnota zvlnění je přesně na hranici povolených hodnot, ale za cenu zmenšení nástřihu se tato hodnota dá tolerovat. Nástřih materiálu byl zmenšen na rozměr 1156x1126 mm. Tzn. úsporu 24mm v ose „x“ a 36mm v ose „y“. Tato hodnota určitě není zanedbatelná. Při výrobě několika set tisíc až milionů kusů se může jednat o velmi vysokou úsporu materiálu a s tím spojených nákladů na výrobu.

Potřebná síla lisu je přibližně  $4,5 \times 10^6$  N a síla na přidržovač byla spočtena na  $1,4 \times 10^6$  N.

Dále k poslední simulaci je uvedena křivku mezního přetvoření pro daný pokus, v předchozích případech nebylo nutné tento parametr kontrolovat, protože výlisek nedosahoval potřebných parametrů.



### Forming Limit Diagram (Linear)

Process step: 20\_Draw, Process time: 1000.000



Obr. 5.19 Křivka mezního přetvoření – desátá simulace

Na obr. 5.19 je vidět, že materiál je bezpečně pod křivkou mezního přetvoření a proto se dá očekávat, že by při lisování neměli nastat

problémy. Ostatně to již bylo patrné z numerických výsledků této simulace.

Na závěr je nutné podotknout, že množství počítaných simulací bylo řádově několikanásobně více, než je v práci uvedeno. Zde jsou vybrány jen kroky, kde došlo k významnější změně výsledků simulace. Ke každé simulaci by však mohla být řada výsledků podle toho, jak se měnila síla na přidržovač, brzdná síla drážek a také v neposlední řadě velikost nástřihu. V případě těchto změn došlo většinou jen k mírnému zlepšení či zhoršení výsledků simulace. Proto byl vždy vybrán pouze jeden výsledek.

## **6. Zhodnocení výsledků**

Díky časově náročnému vývoji tahového modelu s použitím numerické analýzy bylo dosaženo velmi dobrých parametrů při lisování. Tento krok nebyl úplně jednoduchý a vzhledem k neznalosti daného softwaru a nezkušenosti tato práce zabrala mnoho desítek hodin. Je jasné, že zkušenému konstruktérovi by tato práce zabrala daleko méně času a potřeboval by i méně kroků ve vývoji, přesto je numerická simulace nepostradatelná. Z kroků prováděných při vývoji je jasně patrné, že vývoj tahového modelu bez použití simulace by byl velmi náročný nejen časově, ale rozhodně by zaměstnal daleko více lidí a také by stál daleko více peněz, než když se v počítačovém programu změní pouze pár hodnot a může se spustit simulace nová. Toto je asi největší výhodou počítačem podporovaného vývoje. Dále to již bude jen na výrobcích softwaru samotných, jak uživatelsky přívětivé prostředí vytvoří a jak bude výpočet přesný při porovnání s realitou.

Z vyhodnocení výsledků simulací je patrné, že od prvního kroku k poslednímu byl velký kus cesty, ale díky tomuto došlo k velké úspoře materiálu a k poměrně velké jistotě, že pokud bude nástroj správně vyroben, nebude problém díl správně vylisovat. Úspora materiálu mezi první a poslední simulací činí 304x74mm. Navíc pokud by bylo lisováno pomocí nástroje použitého v první simulaci, určitě by nedošlo ke správnému



vylišování dílu. Vzhledem k uvedené úspoře je možné ze stejně velkého kusu materiálu vyrobit 5 kusů výlisku a ne pouze 4. Jak je však patrné, základní myšlenka uspořádání dílů byla správná od samotného počátku, pouze bylo třeba doladit samotný tvar nástroje tak, aby umožnil bezproblémovou výrobu.

Výlisek se nejspíše bude vyrábět na lisu Schuler DBS 2-1000, který má maximální sílu na beran 6000 kN a max. sílu na přidržovač 4000 kN. To znamená, že tento lis by měl daný výlisek bez problému vyrobit s dostatečnou rezervou pro případné změny ve výrobě, neboť potřebné síly jsou cca. 4500 kN na beranu a 1400 kN na přidržovač.

Ač byla samotná konstrukce nástroje poměrně časově náročná, bylo odsimulováno několik desítek simulací, z nichž každá zabrala téměř hodinu času, tak se tato operace vyplatila. Nástroj je nyní téměř připraven k výrobě, kde by následně došlo k vytvoření ploch, které nejsou funkční a tvoří pouze samotnou raznici. Tato konstrukce musí zaručit dostatečnou tuhost nástroje a zajistit dobrou „slícovatelnost“ všech částí nástroje.

## **7. Závěr**

Cílem této práce bylo zmapovat materiály nejčastěji používané při konstrukci a následně pomocí numerické simulace vytvořit „nástroj“, který by byl schopný s dostatečnou procesní jistotou vyrobit zmíněný díl.

Samotný návrh nástroje byl poměrně složitou operací a počet simulací tedy dosahoval několika desítek, ale skoro všechny simulace měly jeden společný znak a tím byl problém s vysokým zvlněním plechu. Velmi dlouhou dobu se tento problém nedařilo vyřešit a už se zdálo, že díl nebude možné zvoleným způsobem vyrobit v požadované kvalitě. Po velkém množství pokusů a úpravách tvaru, kde byl především velmi omezující samotný tvar výlisku, se podařilo problémy se zvlněním plechu odstranit. Pro tuto práci jsou vybrány nejvýznamnější kroky, kdy došlo k pozitivním posunům ve výsledku simulace. Výhodou takovýchto numerických simulací je možnost vyzkoušet velké množství variant, aniž by bylo potřeba nástroj vyrábět a

upravovat, což by představovalo výrazné zvýšení nákladů a časovou náročnost se zdoluhavým ověřováním jednotlivých pokusů.

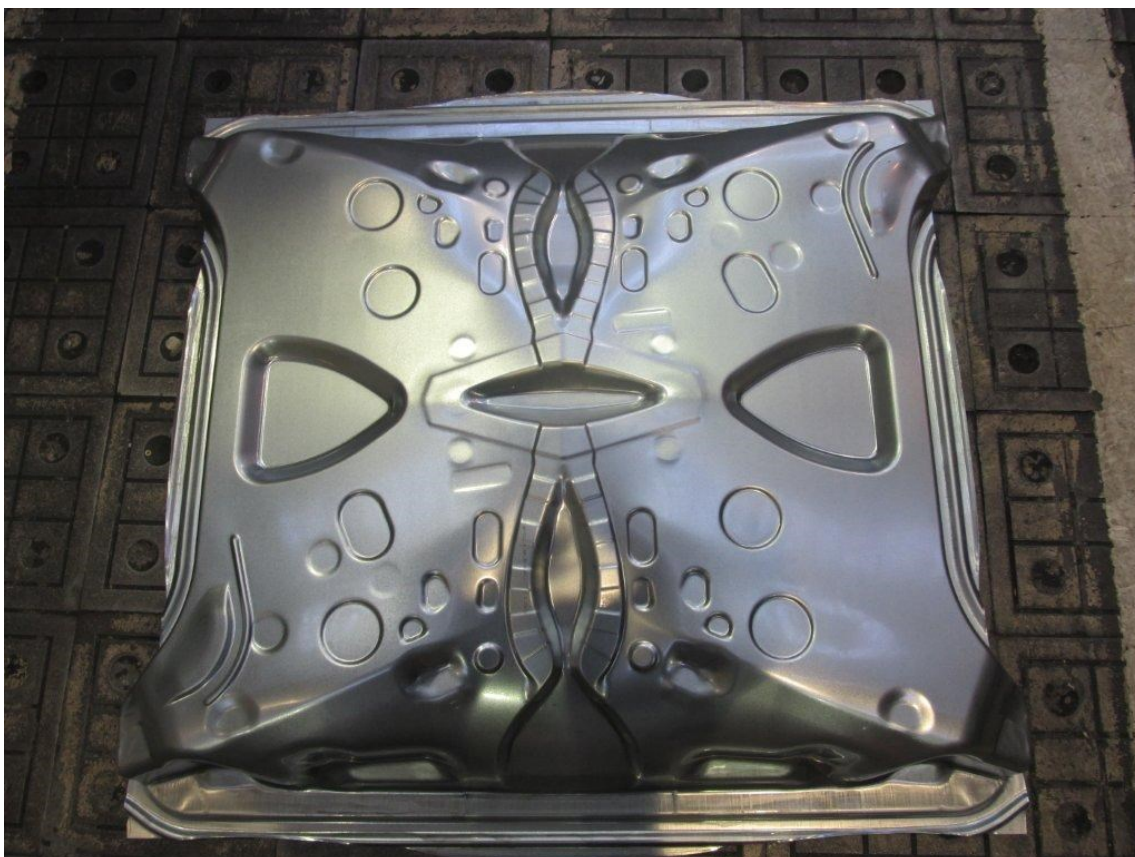
Dá se však předpokládat, že v současnosti používané programy pro výpočet takto náročných úkonů, budou v budoucnu nahrazovány ještě přesnějšími a spolehlivějšími. Bohužel však zřejmě nikdy nebude možné dosáhnout 100% přesného výsledku, ale vždy bude snaha se tomuto stavu co nejvíce přiblížit.

Nástroj, ač ještě s mírně upravenou geometrií, dnes opravdu vyrábí vybraný díl karoserie. Důvodem následných změn byla mírná úprava samotného dílu a nejspíše i další požadavky ze strany zadavatele zakázky pro dosažení ještě lepších parametrů lisování. Následně ještě například došlo k vytvoření dalších brzdících drážek. Jak výsledný díl vypadá, je možné vidět na obrázku 7.1.



Obr. 7.1 Konečný tvar dílu

Asi nejvýraznější změnou je vytvoření nového prolisu podél lemu. Tento prolis však je vytvořen pouze na levém dílu. Další obrázek, tj. obr. 7.2 ukazuje výsledný tvar plechu po operaci tažení, která byla předmětem této práce.



Obr. 7.2 Tvar výlisku po operaci tažení

Poznatky získané v průběhu tvorby této práce byly převedeny z teoretické roviny i do praxe a díky tomu se dnes vyrábí skutečný díl automobilové karoserie.

## Použitá literatura

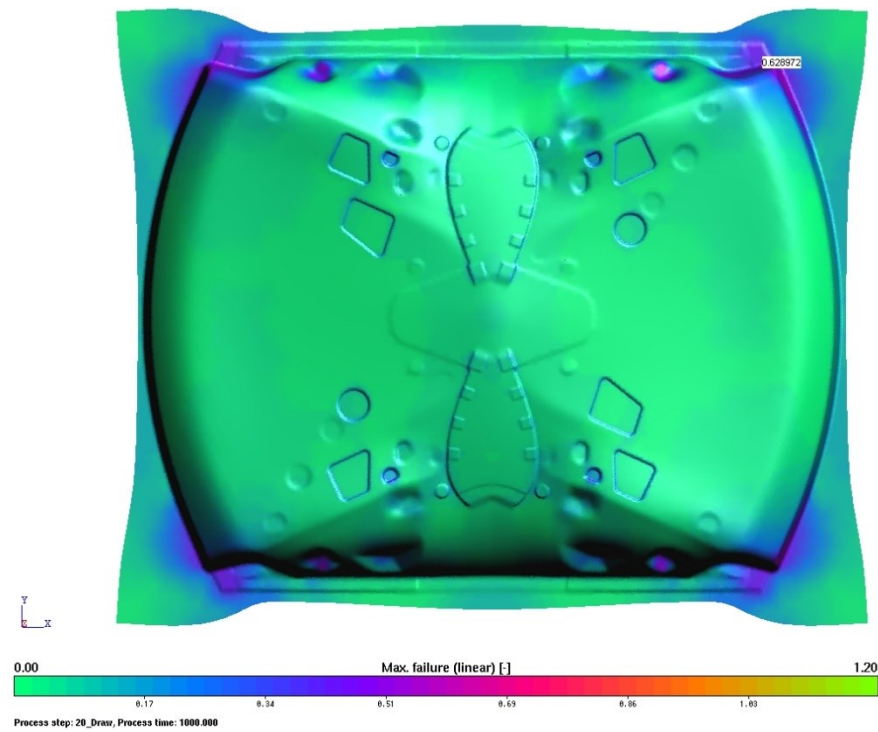
- [1] Data z firmy Škoda Auto a.s.
- [2] DIN EN 10327. *Continuously hot-dip coated strip and sheet of low carbon steels for cold forming*. 2004.
- [3] GIRMAN, V. a V. HRABČÁKOVÁ. *Kovové materiály automobilových konstrukcií – II: Karoséria a karosárske plechy* [online]. Katedra fyziky kondenzovaných látok, UPJŠ, Košice, 08. 02. 2012, ISSN 1337-8953. Dostupné z: [http://www.materialing.com/materialy\\_auto\\_konstrukcii](http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii)
- [4] *Arcelormittal* [online]. 19-11-2012 [cit. 2013-01-07]. Dostupné z: [http://www.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/catalogue.pl?id\\_sheet=F&header=&language=EN](http://www.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/catalogue.pl?id_sheet=F&header=&language=EN)
- [5] SOLFRONK, P. *Numerická podpora výroby výlisků z plechu*. 2012. Habilitační práce. TU v Liberci.
- [6] JÍRA, M. *Úspora hmotnosti automobilové karoserie použitím pevnostních plechů*. 1999. Diplomová práce. TU v Liberci.

# Přílohy

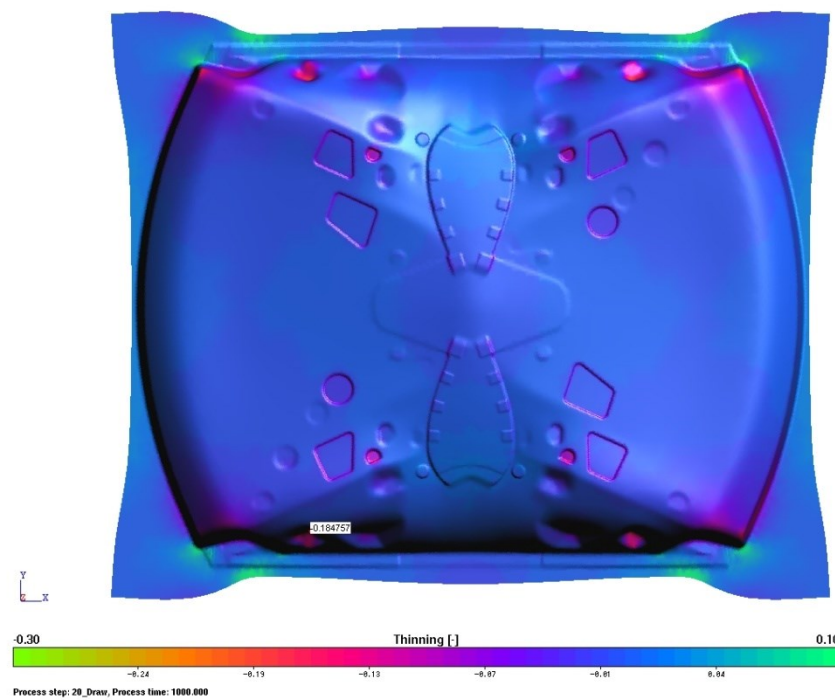
### **Seznam příloh**

1. První simulace
2. Druhá simulace
3. Třetí simulace
4. Čtvrtá simulace
5. Pátá simulace
6. Šestá simulace
7. Sedmá simulace
8. Osmá simulace
9. Devátá simulace
10. Desátá simulace

## První simulace

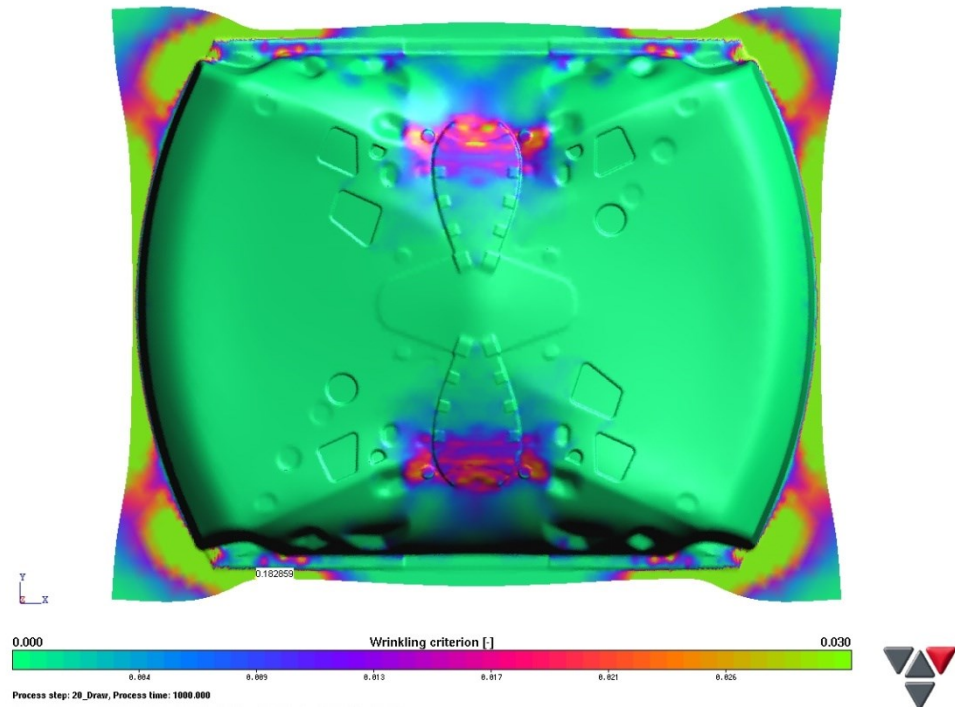


## Riziko vzniku trhliny



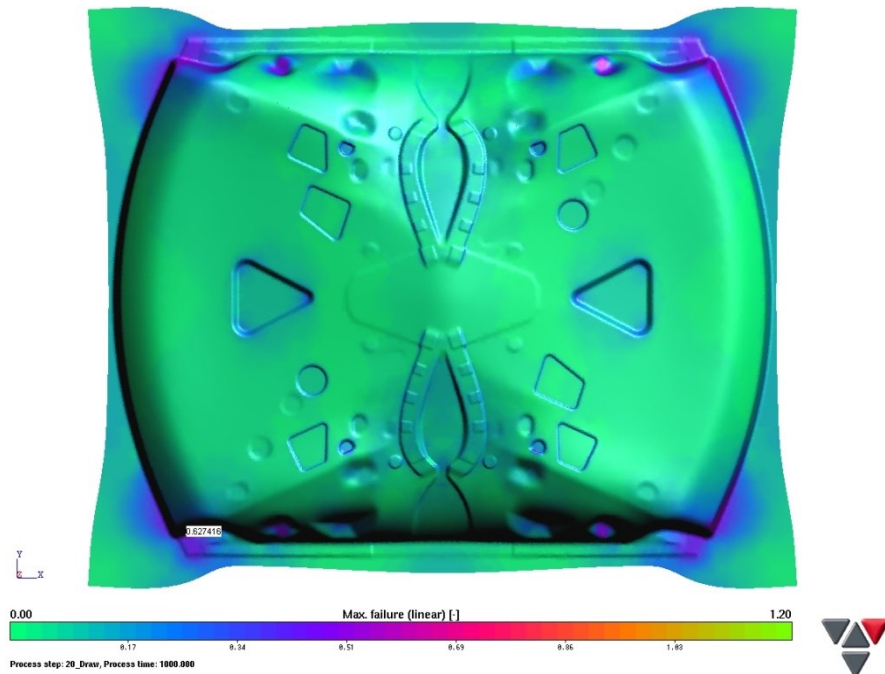
## Ztenčení





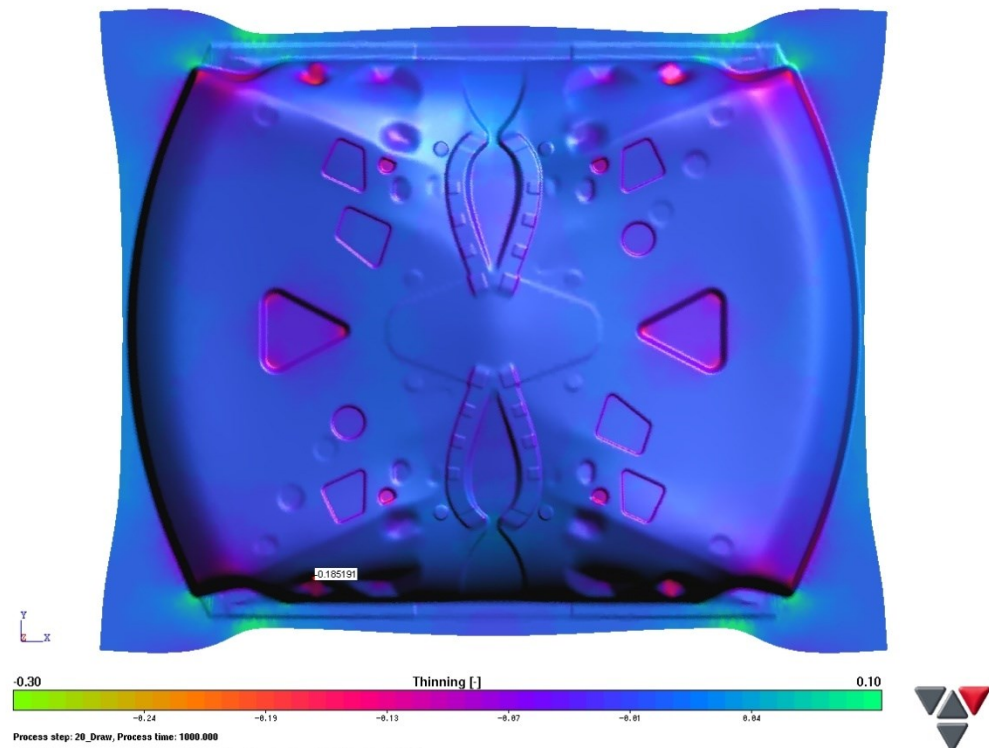
Zvlňení

Druhá simulace

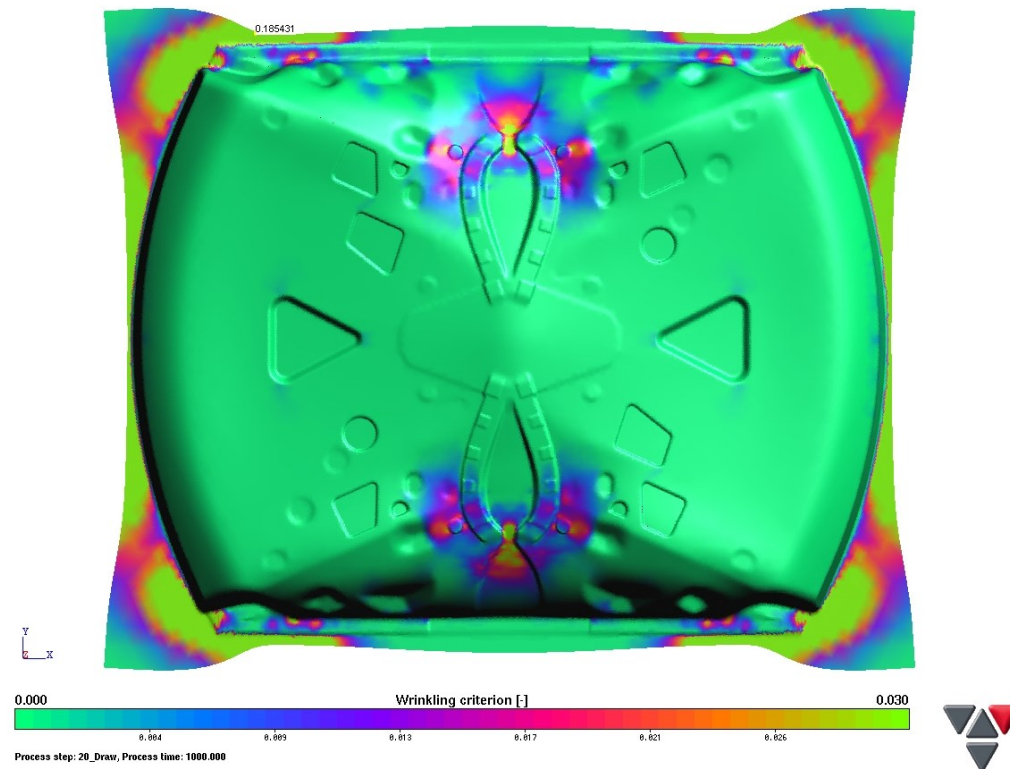


Riziko vzniku trhliny



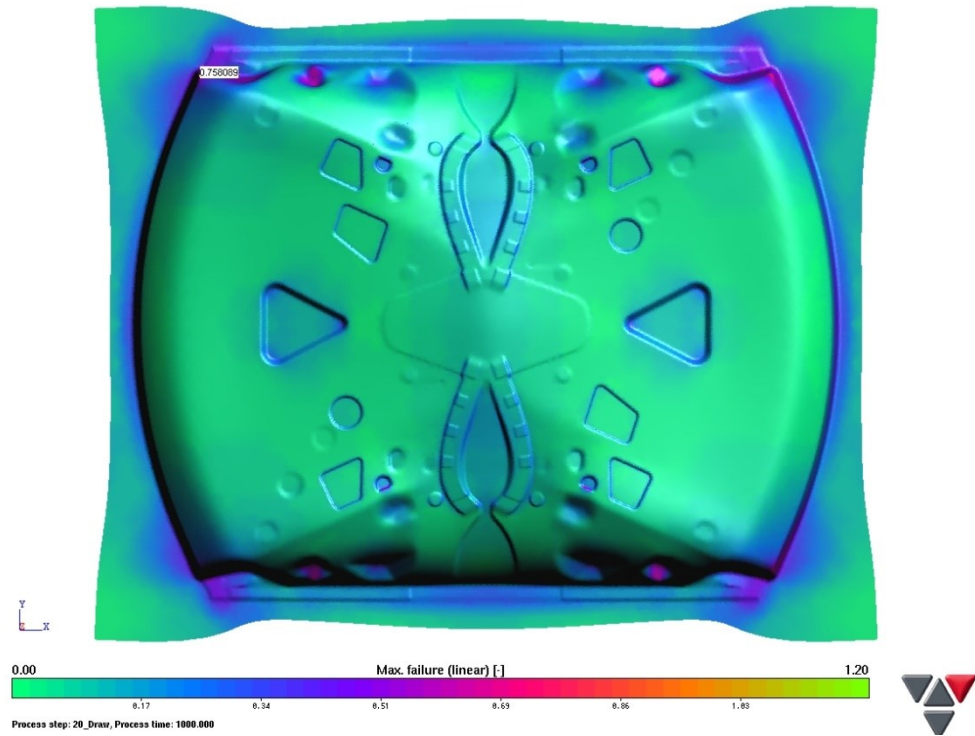


Ztenčení

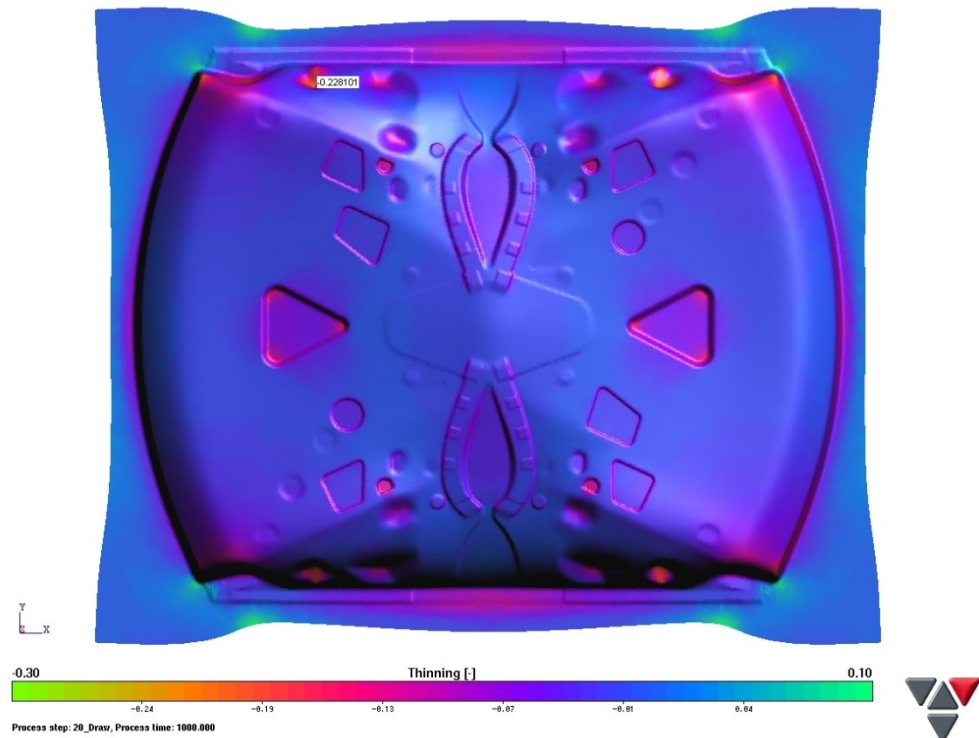


Zvlnění

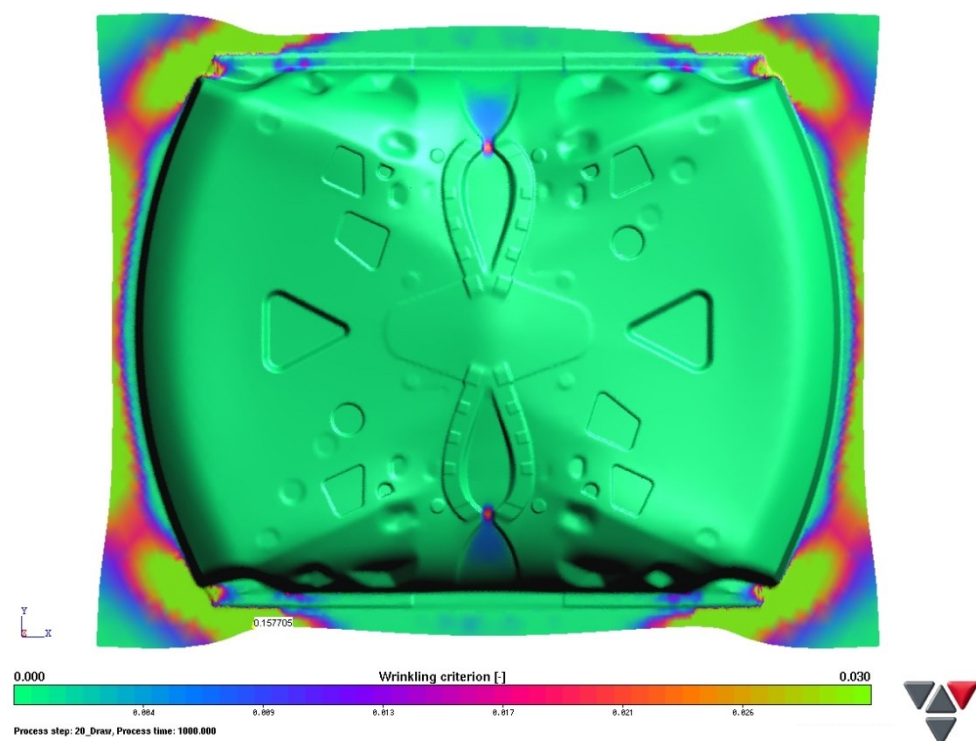
Třetí simulace



Riziko vzniku trhliny

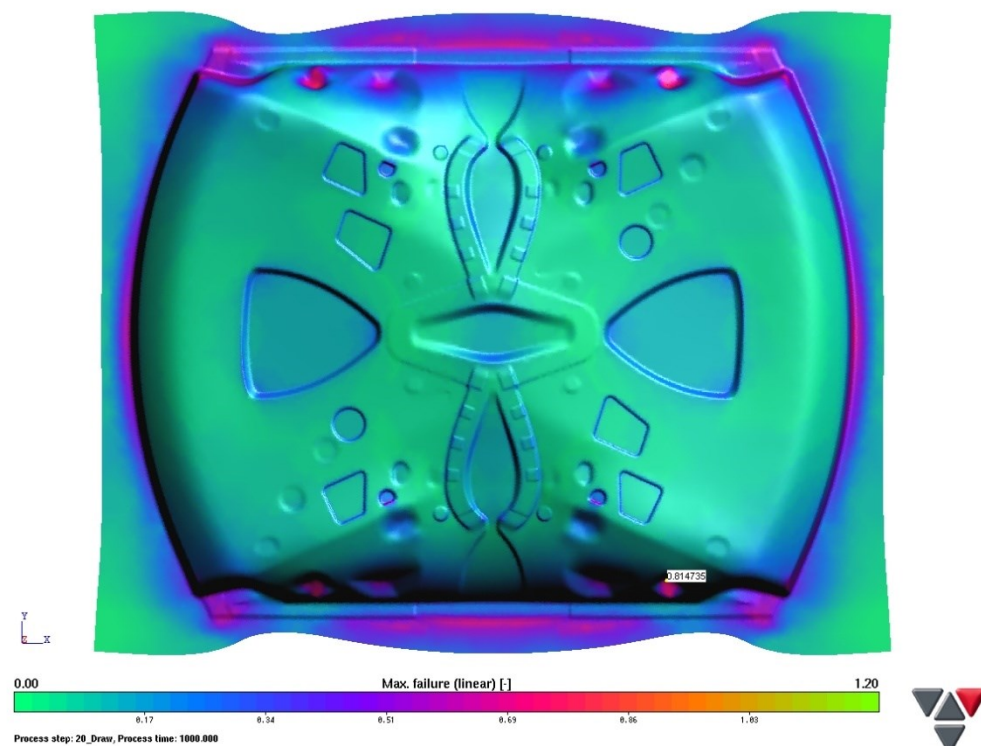


Ztenčení



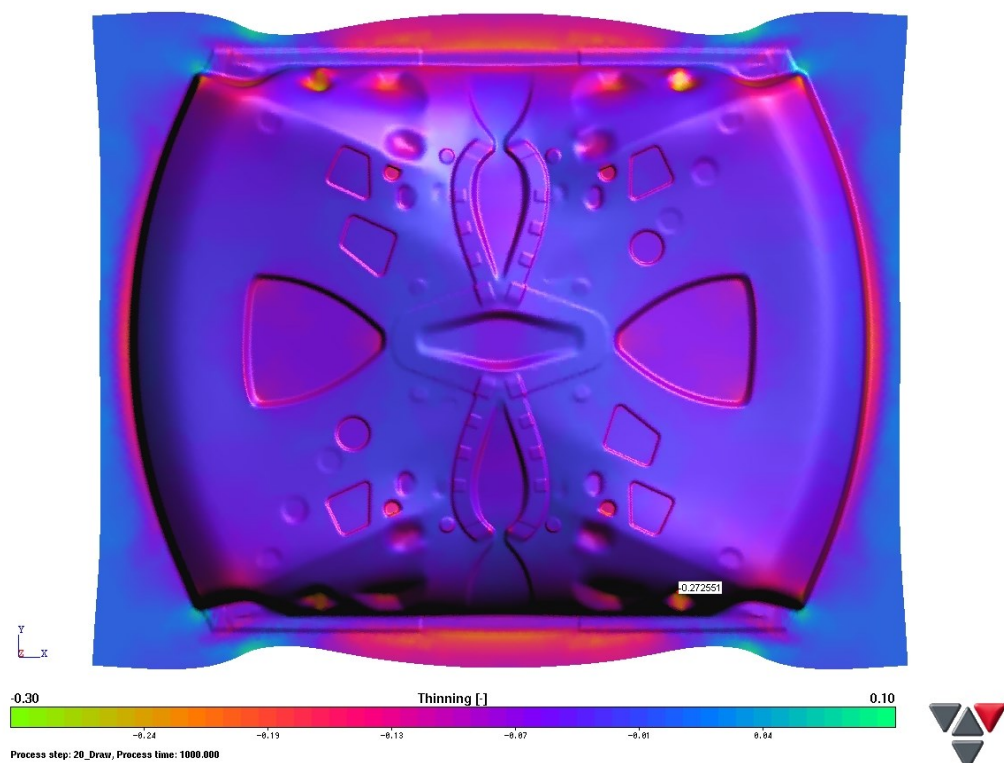
Zvlňení

Čtvrtá simulace

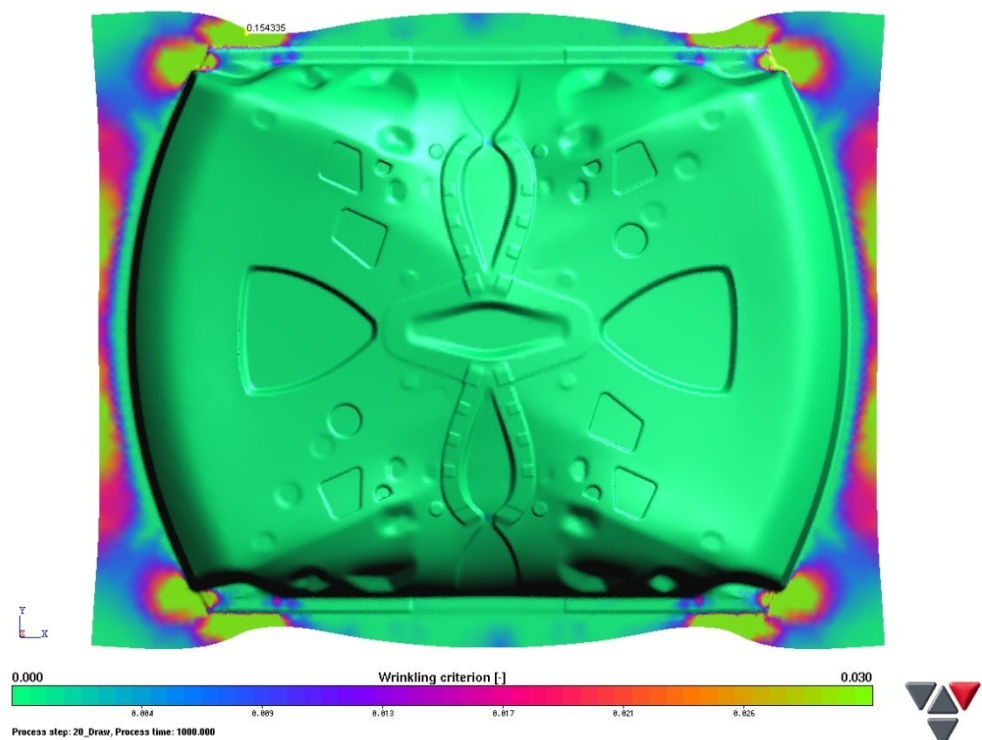


Riziko vzniku trhliny



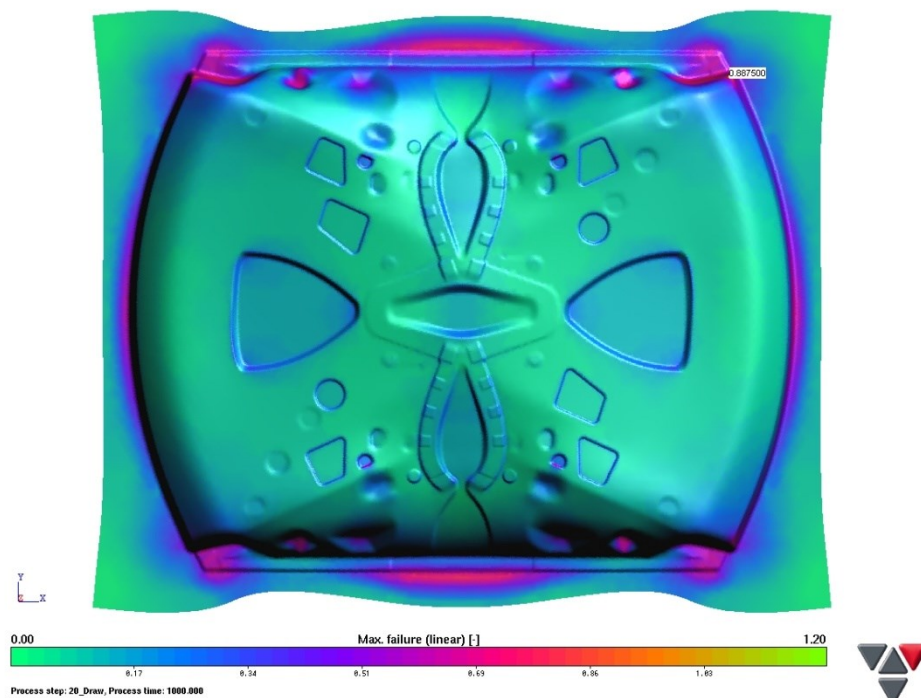


Ztenčení

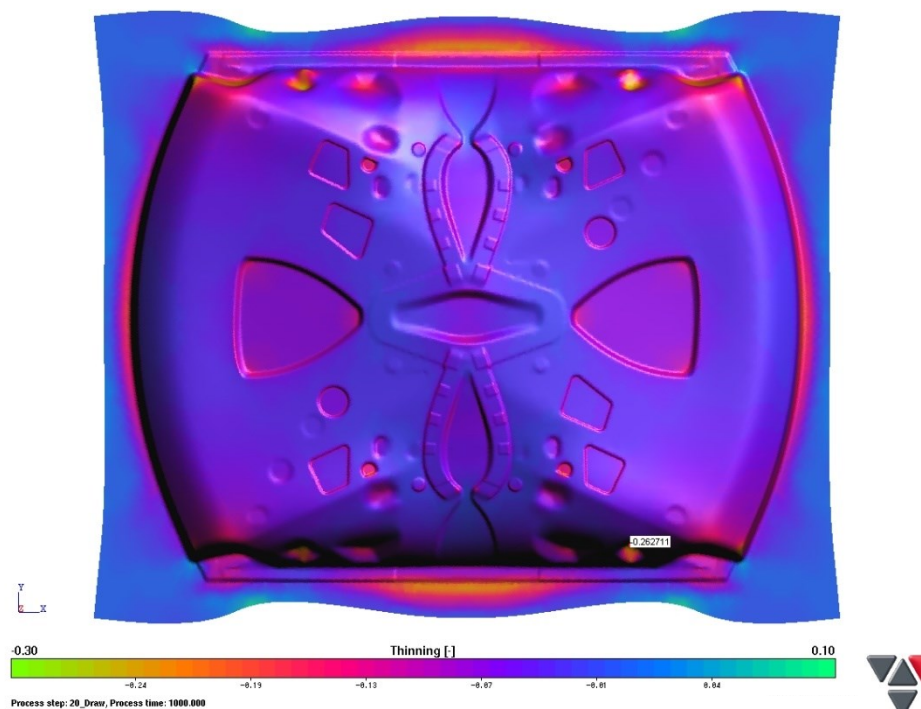


Zvlnění

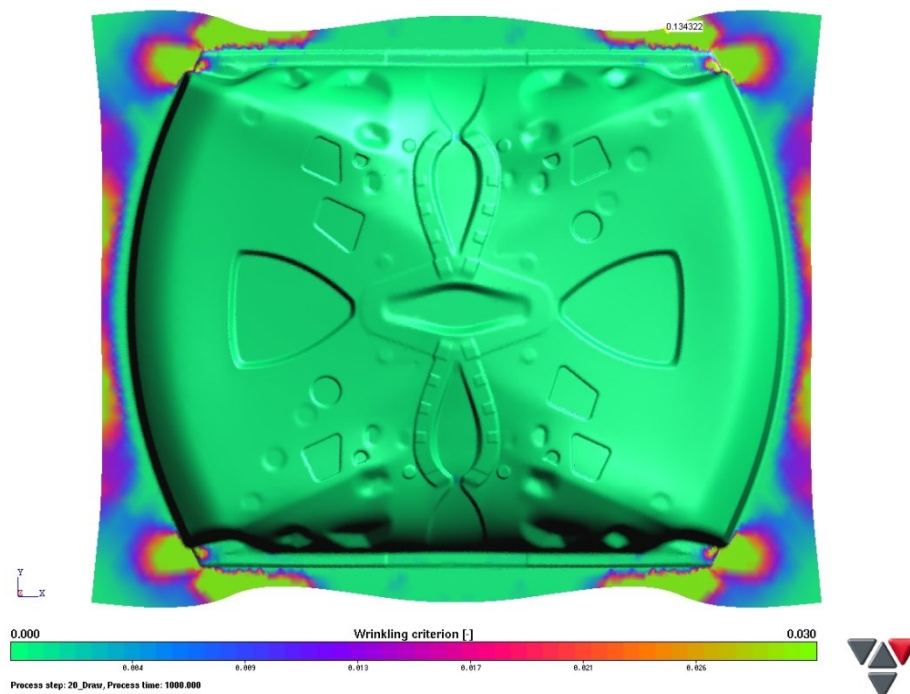
## Pátá simulace



## Riziko vzniku trhliny

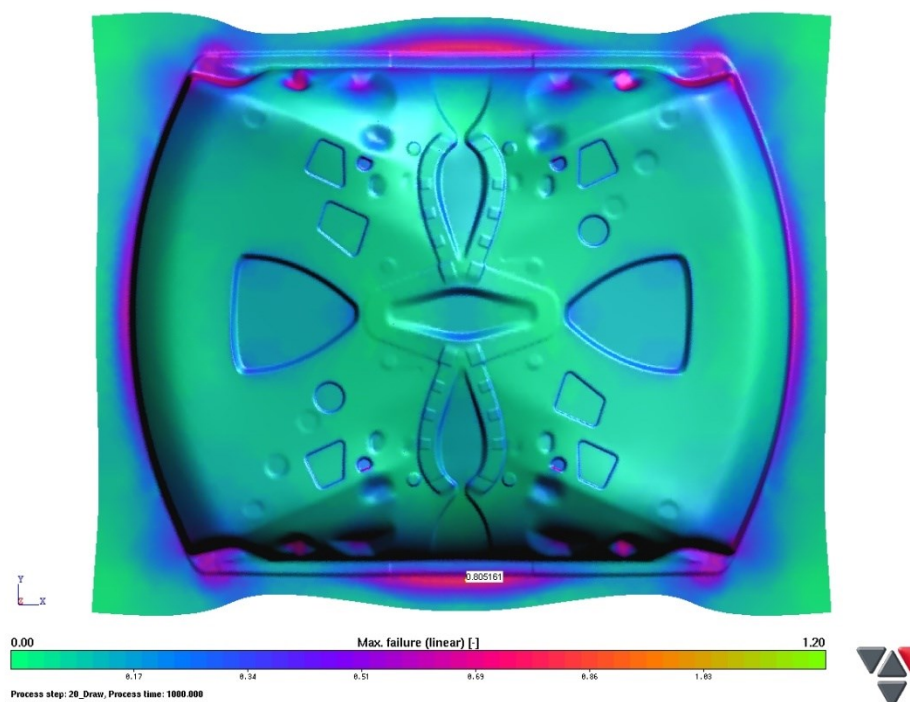


## Ztenčení



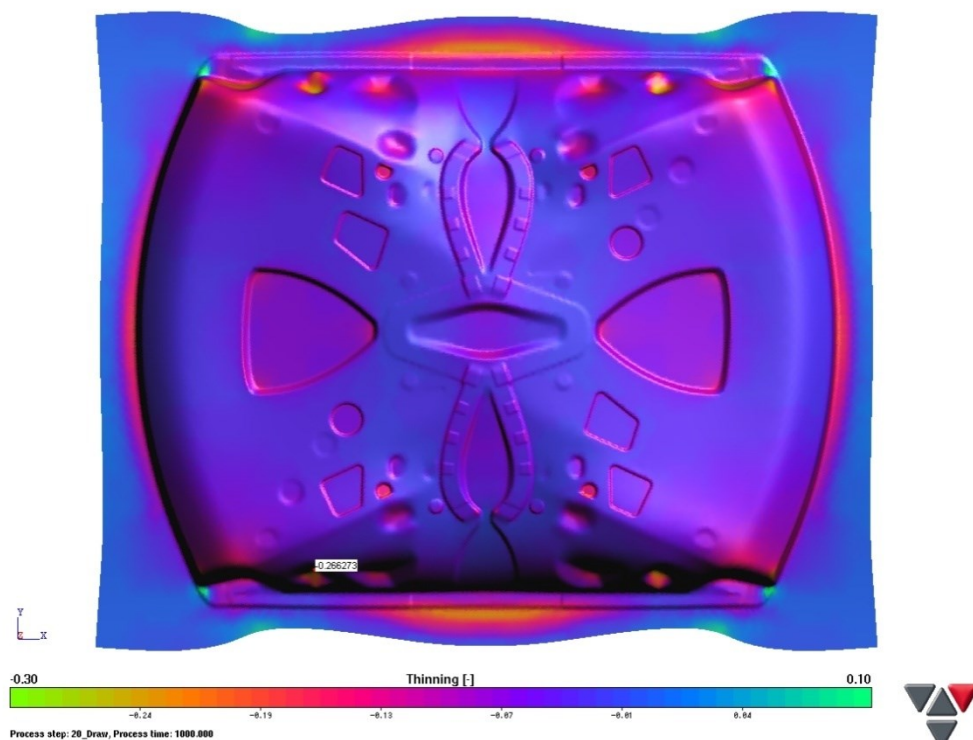
Zvlňňň

Šestá simulace

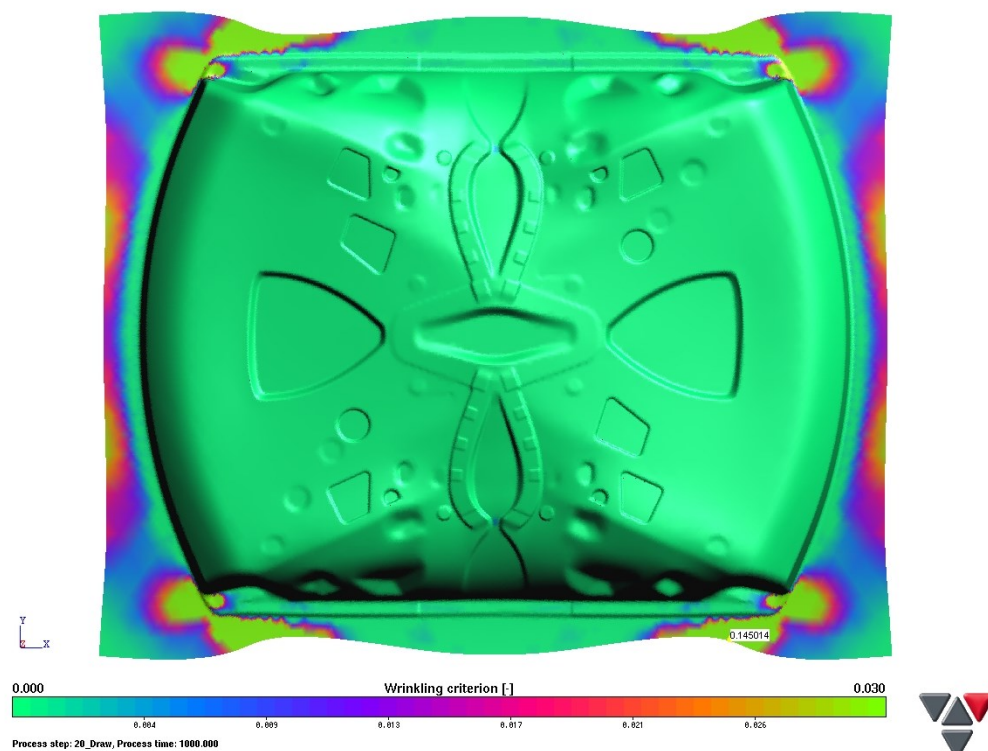


Riziko vzniku trhliny



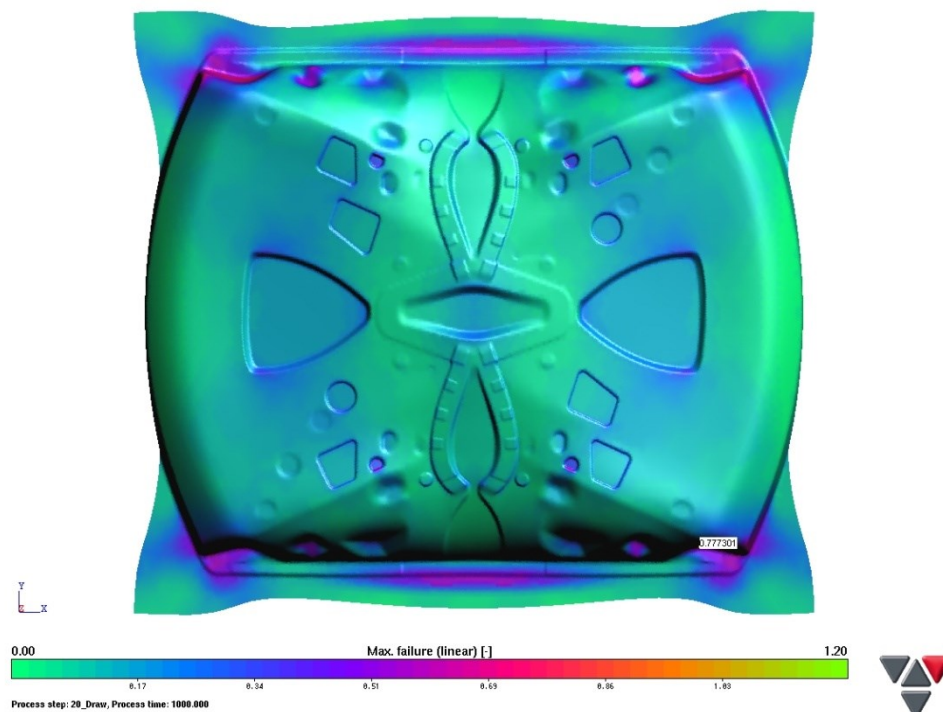


Ztenčení

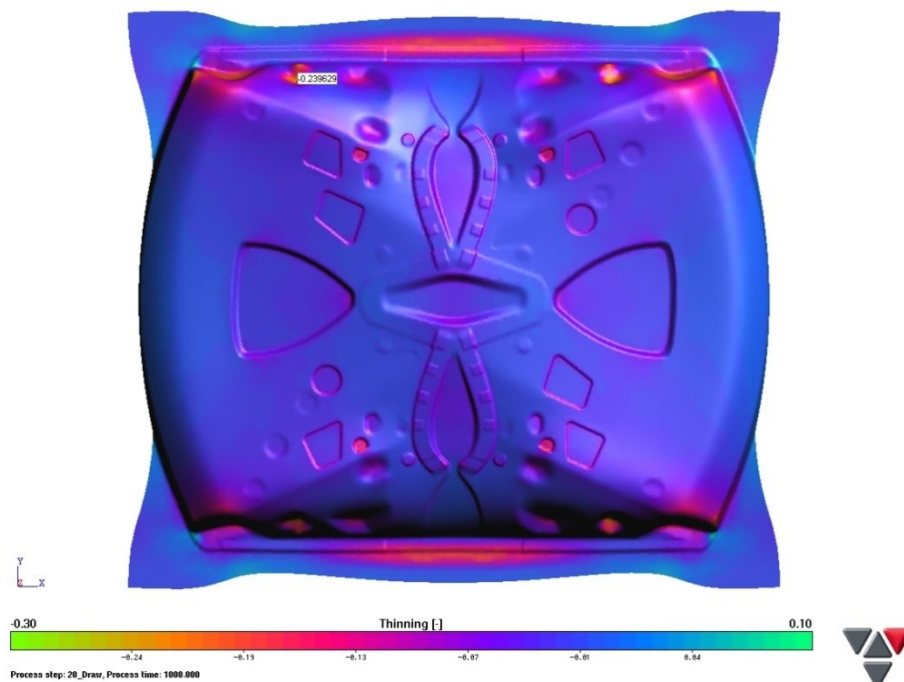


Zvlnění

## Sedmá simulace

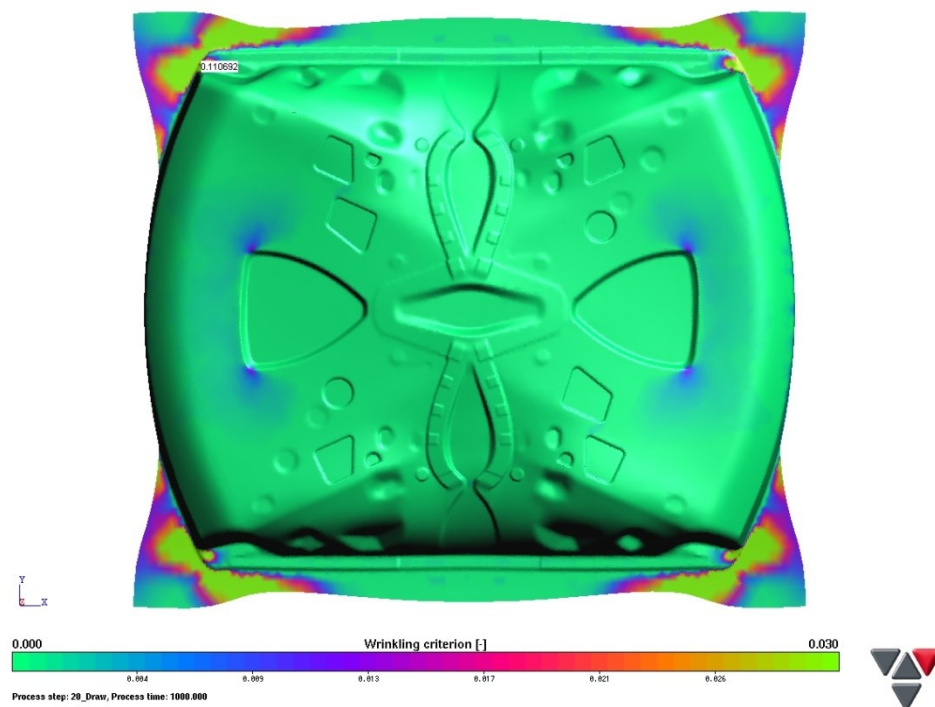


## Riziko vzniku trhliny



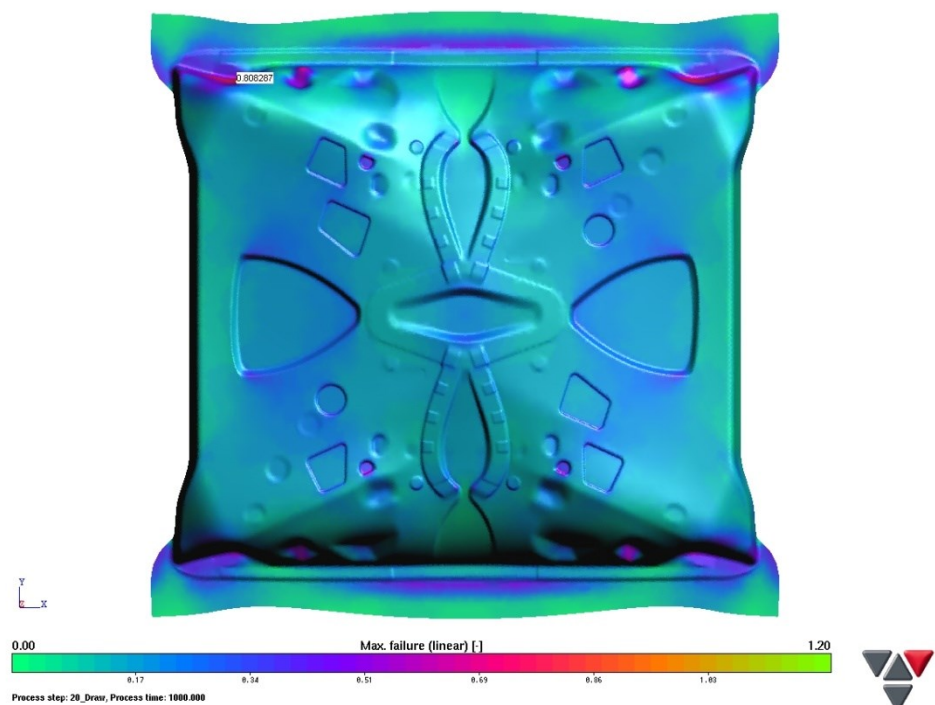
## Ztenčení



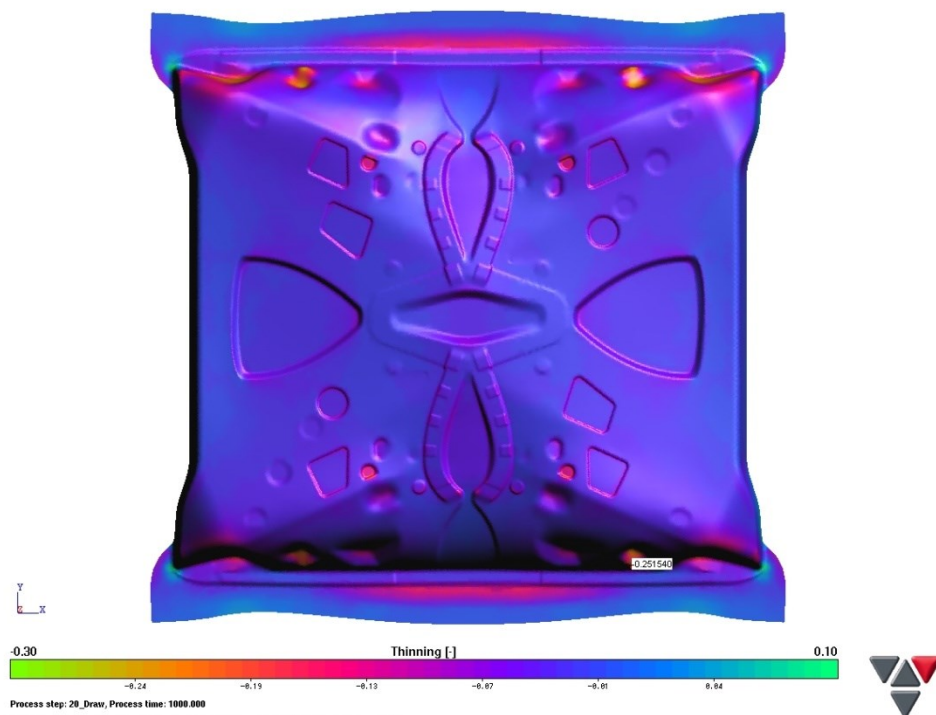


Zvlňňí

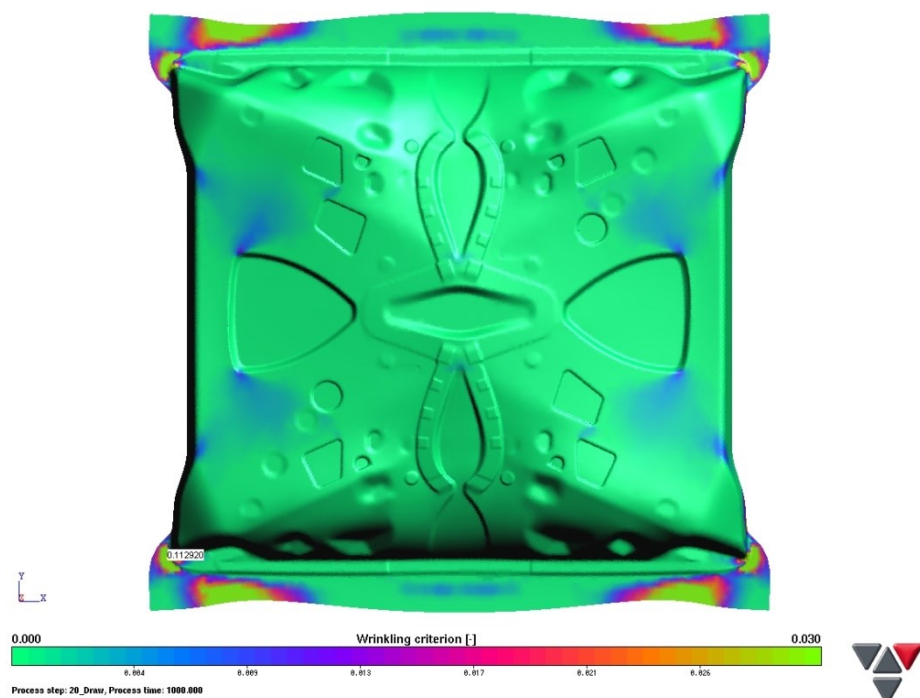
Osmá simulace



Riziko vzniku trhliny

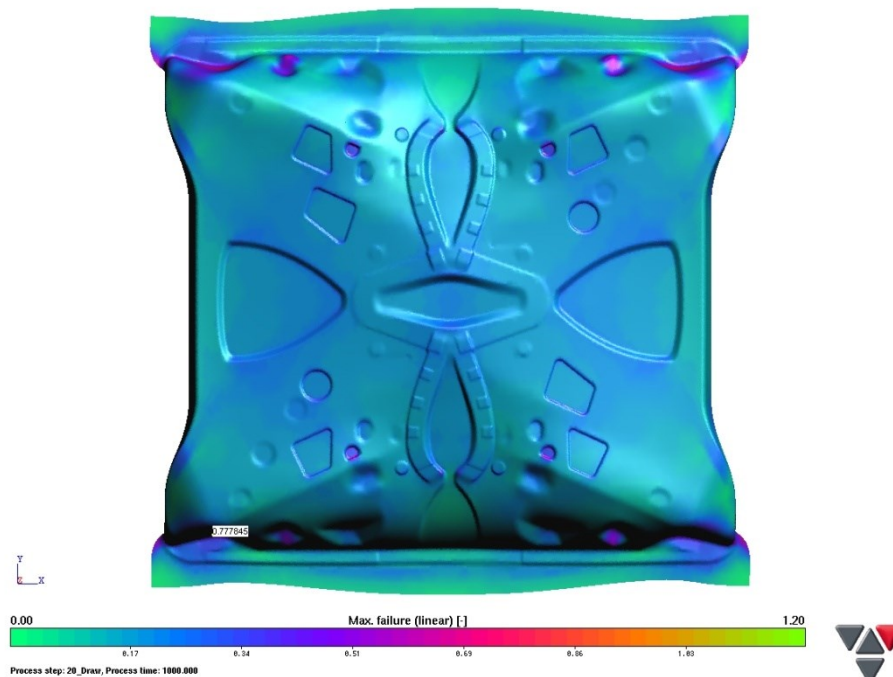


Ztenčení

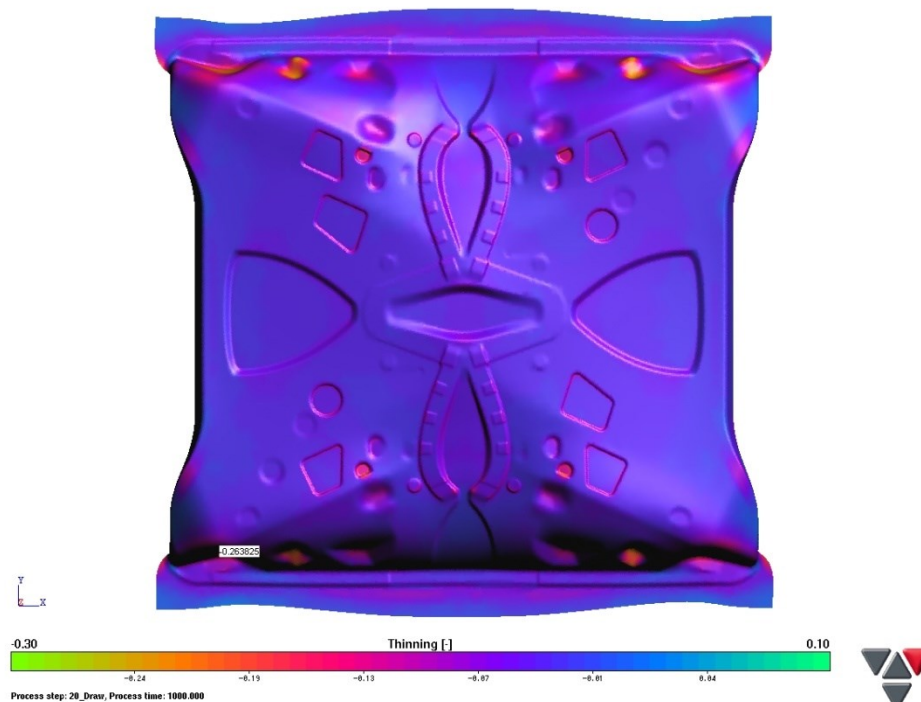


Zvlnění

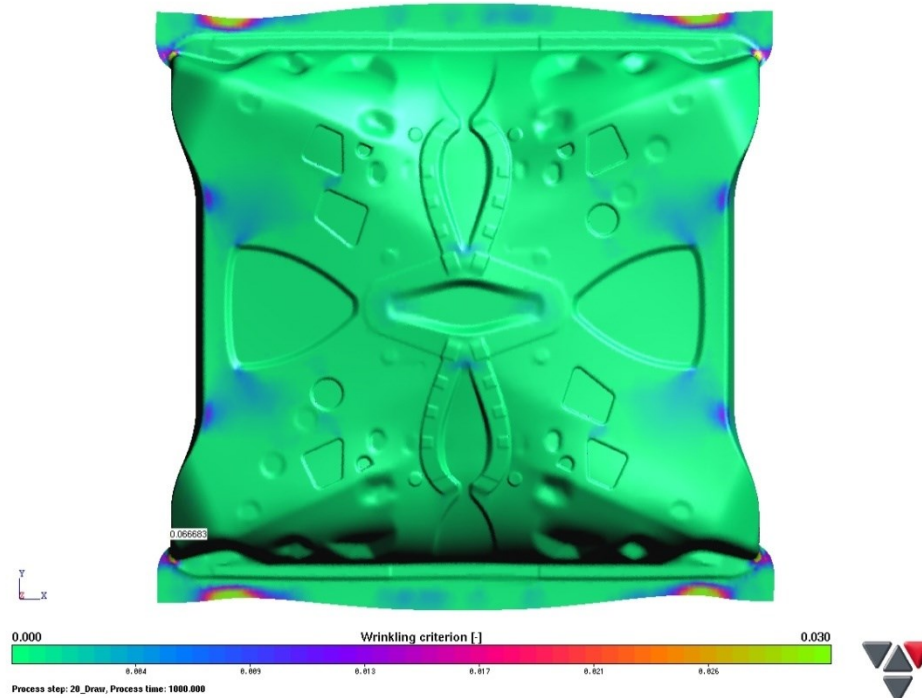
## Devátá simulace



## Riziko vzniku trhliny

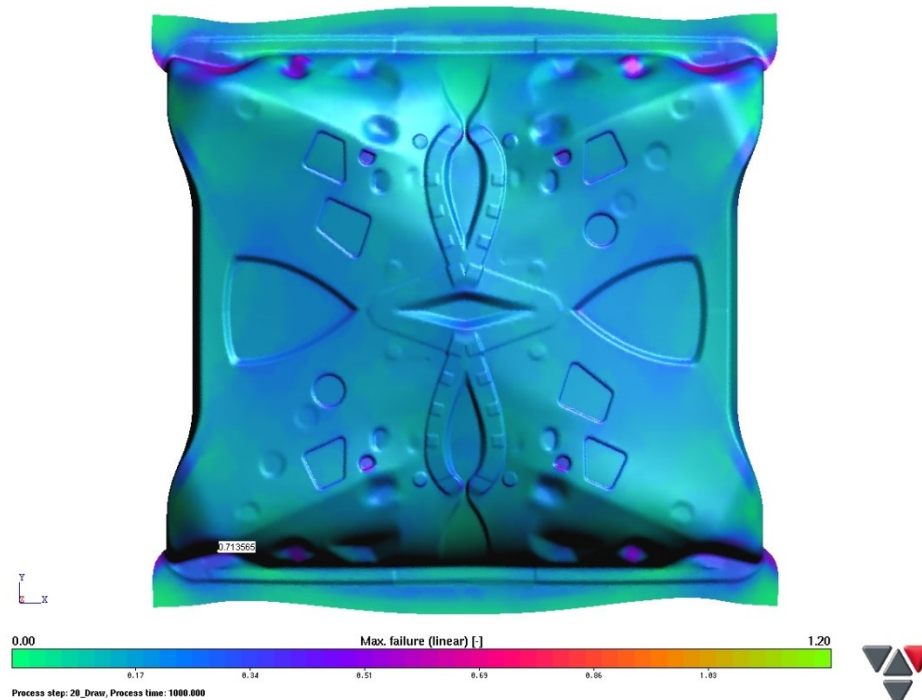


## Ztenčení



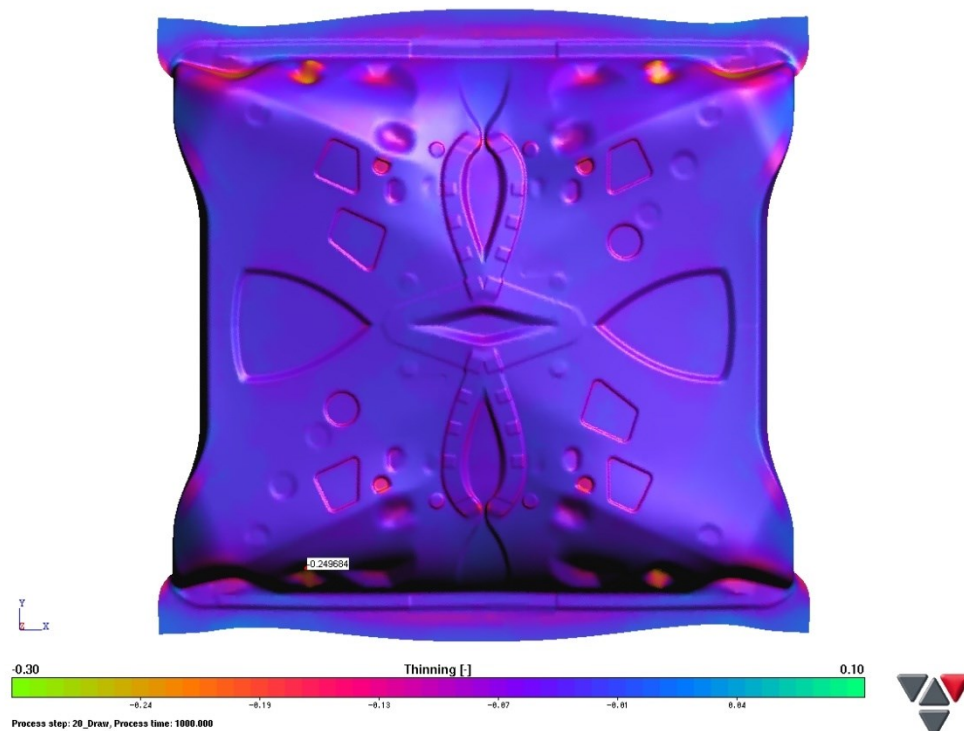
Zvlňňň

Desátá simulace

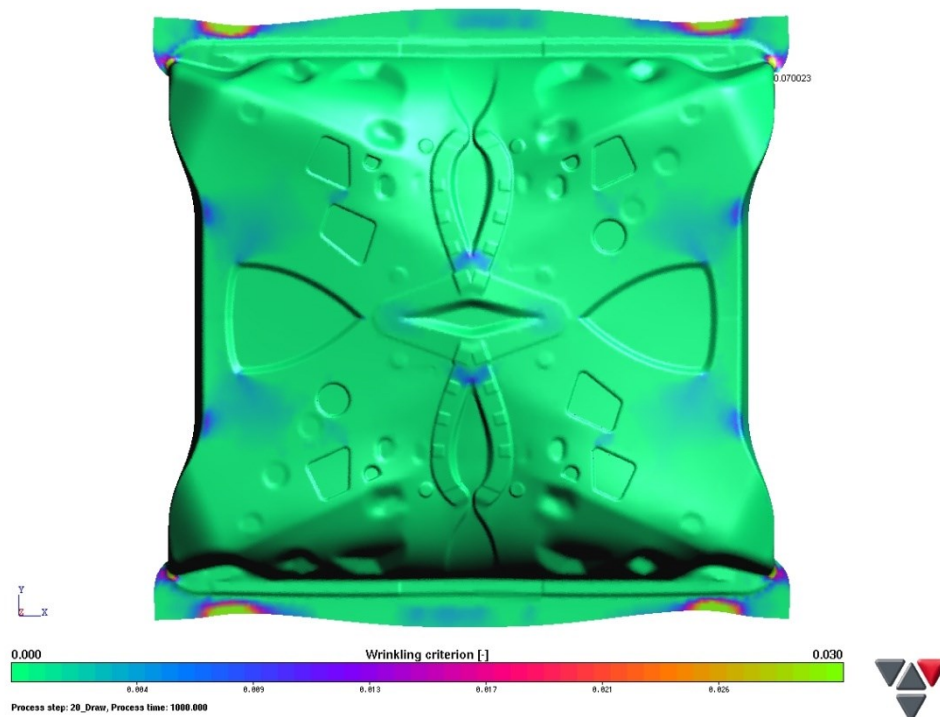


Riziko vzniku trhliny





Ztenčení



Zvlnění

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis:

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24.5.2013

Signature: